

Sistema Binaural para Detecção sem Contato de Fugas em Gases e Líquidos

Maria Teresa Rodrigues da Silva

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. João Manuel Ribeiro da Silva Tavares

Engº. Jorge Manuel de Matos Reis



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Ramo de Automação**

Fevereiro de 2016

À minha família

Resumo

Equipamentos de localização de avarias por detecção ultrassónica são muito procurados e requisitados por parte de empresas industriais. Isto deve-se ao facto de serem dispositivos que contribuem não só para a prevenção de problemas industriais de fugas, mas também para uma melhor manutenção e reparação de equipamentos. Desta forma, este tipo de aparelho revela-se de grande utilidade e importância em instalações industriais.

A atual dissertação, realizada no âmbito do Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica, teve como objetivo o desenvolvimento de um dispositivo binaural de localização de fugas de gases e líquidos por detecção ultrassónica. Para além disso, o dispositivo é sintonizável numa vasta gama em frequência e proporciona a capacidade de realizar a detecção de avarias à distância por indicação informativa na gama audível do utilizador.

Para alcançar os objetivos mencionados, foram desenvolvidas duas placas de circuito impresso, nas quais se montou os componentes eletrónicos de acordo com um circuito previamente desenvolvido e esquematizado. No sistema inclui-se o acesso a um potenciómetro para regular o volume do sinal sonoro de saída e um outro potenciómetro para executar a sintonização da frequência. Para a realização da conversão de frequências ultrassónicas em frequências audíveis pelo ser humano, entre outras funções, foi utilizado um circuito integrado PLL (*Phase Locked Loop*).

Finalizada a conceção do dispositivo experimental, foram realizados testes com o intuito de averiguar se os objetivos previstos foram alcançados e para identificar quais as aplicações passíveis da sua utilização. Após a realização de algumas experiências, foi possível notar que os objetivos inicialmente propostos foram na integra alcançados e, para além disso, foi possível ouvir a abertura e o fecho de válvulas no interior de uma servo válvula, óleo a circular dentro de condutas e também os ruídos dos rolamentos internos de um acoplamento motor eléctrico-bomba permitindo assim determinar eventuais batimentos repetitivos correspondentes a rolamentos gripados.

Por fim, pode-se concluir que os resultados obtidos foram bastante positivos. Para além de, com o dispositivo projetado e desenvolvido, ser possível detetar e localizar fugas, a partir das particularidades sonoras na gama audível é também possível, em alguns casos, saber se o fluxo detetado é laminar ou turbulento. Por outro lado, este aparelho poderá ser aplicado nas mais diversas instalações industriais, proporcionando uma confortável segurança para o seu utilizador na sequência da possibilidade da detecção sem contacto à distância. Este é, de facto, um projeto bastante encorajador e estimulante que apresenta características que o tornam bastante multifacetado.

Binaural Non-Contact Leak Detector

Abstract

Ultrasonic leak detectors are commonly sought by industrial companies. This is due to the fact that these equipments contribute not only for the prevention of industrial leak problems, but also for the improvement of machinery maintenance and repair. Therefore, the use of this type of appliance is greatly important for industrial installations.

The present thesis, held under the Master's Degree in Mechanical Engineering of the Faculty of Engineering of the University of Porto, aimed to develop a binaural ultrasonic leak detector. Furthermore, the device is tunable in a wide frequency range as well as have the ability to locate malfunctions from a distance through an informative indication in the audible range of the user.

In order to achieve this goals, two printed circuit boards were developed, in which electronic components were assembled according to a previously outlined circuit. In the established system was included the access to a potentiometer with the purpose of regulating the volume of the output signal and also another potentiometer to tune the heterodyning frequency. To convert the ultrasonic signal into an audible signal a PLL (Phase Locked Loop) integrated circuit was applied.

With the construction of the experimental device concluded, some tests were performed in order to check if the set out goals were accomplished and also to identify in which application it can be used. After the conclusion of this experiences, it was possible to see that all the goals were achieved and, additionally, it was possible to hear valves opening and closing inside of a servo valve, as well as the oil circulating in the interior of ducts. Moreover, it was also possible to listen to the noise of the internal bearings of an electric motor – pump coupling thus allowing to determine any repetitive beats corresponding to seized bearings.

Finally, it can be concluded that the obtained results were extremely positive. Besides the fact that the designed device can detect and locate leaks, from the sound particularities in the audible range it is also possible, in some cases, to distinguish whether the flow is laminar or turbulent. On the other hand, this device can be applied in a variety of industrial installations, providing a comfortable safety for the user as a result of the possibility of performing non-contact defect detection. This is indeed a tremendously encouraging and stimulating project with features that make it quite multifaceted.

Agradecimentos

Ao longo deste trabalho houve diversas pessoas que contribuíram de algum modo para a concretização deste projeto às quais gostaria de agradecer.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor João Tavares e Engenheiro Jorge Reis, pela disponibilidade e por me terem concedido a oportunidade de realizar este projeto. Ao Engenheiro Jorge Reis agradeço não só pela orientação e apoio que me ofereceu, mas também por tudo o que me ensinou.

Ao Tiago Andrade pelo apoio na conceção das placas de circuito impresso fundamentais para a realização do projeto.

Gostaria de agradecer a todos os meus amigos que sempre me apoiaram e me ajudaram a superar os momentos mais difíceis.

Um especial obrigado a toda a minha família, sem a qual não teria sido possível alcançar os meus objetivos. Agradeço aos meus pais e à minha irmã pela motivação, inspiração e apoio que sempre me ofereceram. Obrigada por tudo!

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento do Projeto	1
1.2.	Objetivos do projeto	1
1.3.	Estrutura da dissertação	2
1.4.	Contribuições Alcançadas	3
2.	Estado da Arte	4
2.1.	Dispositivos de Detecção de Gases por Detecção Ultrassónica	4
2.1.1.	Detetor de Fugas Ultrassónico FLEX.US	4
2.1.2.	Detetor de Fugas Ultrassónico TMULD-300 com Transmissor Ultrassónico UT-300	5
2.1.3.	Detetor de Fugas Ultrassónico Whisper	7
2.1.4.	Dispositivo de Diagnóstico MDE-2000 NC	8
2.1.5.	Detetor de Fugas Ultrassónico TMSU 1	10
2.2.	Detetores de Morcegos	11
	<i>Sistema de Detecção de Morcegos Anabat II</i>	12
2.3.	Conclusão	12
3.	Fundamentos Teóricos	13
3.1.	Divisão de Frequência	13
3.2.	Recetor Superheteródino	13
3.3.	Heterodinagem	14
3.4.	Oscilador Local	15
3.4.1.	Oscilador de Frequência Variável	15
3.4.2.	Oscilador de Cristal	15
3.4.3.	Sintetizadores de Frequência	16
3.5.	<i>Phase Locked Loop, PLL</i>	17
4.	Sensores Piezoelétricos	19
4.1.	Estrutura e Configuração de Sensores Piezoelétricos	20
4.2.	Transdutores Piezoelétricos	21
	<i>Transmissão e Reflexão de Ondas</i>	21
5.	Projeto e Desenvolvimento	23
5.1.	Parte Eletrónica do Projeto	23
5.2.	Suporte para os Sensores	25

5.3.	Desenho para a Tampa da Caixa	27
5.4.	Desenvolvimento	28
6.	Testes Experimentais	35
7.	Conclusões e Trabalhos Futuros	40
7.1.	Conclusões	40
7.2.	Trabalhos Futuros	41
	Referências	42

Índice de Figuras

Figura 2.1 – FLEX.US da empresa SDT International.....	5
Figura 2.2 – TMULD-300 da empresa <i>Amprobe</i>	6
Figura 2.3 – Whisper da empresa <i>Inficon</i>	8
Figura 2.4 – MDE-2000 NC da empresa <i>Spectronics</i>	9
Figura 2.5 – TMSU 1 da empresa SKF	10
Figura 2.6 – ANABAT II da <i>Titely Electronics</i> (Austrália)	12
Figura 3.1 – Diagrama de blocos do recetor superheteródino [9]	14
Figura 3.2 – Utilização de isolador para montagem do cristal num PCB [9].....	16
Figura 3.3 – Diagrama de blocos de um sintetizador de frequência [9]	17
Figura 3.4 – Diagrama de blocos de um PLL.....	18
Figura 4.1 – Demonstração do efeito piezoelétrico	19
Figura 4.2 – Tipos de estrutura que o sensor piezoelétrico pode assumir [13]	20
Figura 4.3 – Configurações possíveis para o material piezoelétrico [13]	21
Figura 4.4 – Transmissão e reflexão de uma onda sonora na fronteira entre dois meios distintos.....	22
Figura 5.1 – Diagrama de blocos do circuito.....	24
Figura 5.2 – Circuito elaborado no programa EAGLE	24
Figura 5.3 – Posicionamento dos componentes para a placa PCB (<i>Layout</i>)	24
Figura 5.4 – Comprimento de onda	25
Figura 5.5 – Dimensões dos sensores	26
Figura 5.6 – Desenho concebido no programa <i>Microsoft Visio</i> para a tampa da caixa do dispositivo.....	28
Figura 5.7 – Placa de circuito impresso (PCB)	28
Figura 5.8 – Placa PCB com os componentes montados	28
Figura 5.9 – Teste realizado à primeira placa PCB para verificar se o circuito funciona de acordo com o pretendido.....	29
Figura 5.10 – Gerador de frequências de diversas formas de onda a gerar 110 kHz	29
Figura 5.11 – Osciloscópio a demonstrar o sinal recebido pelo sensor ao captar 110 kHz	29
Figura 5.12 – Teste realizado às duas placas PCB para verificar a possibilidade de alcançar o efeito binaural.....	30
Figura 5.13 – Transdutor transmissor ligado ao gerador de frequências (HP 33120A) .	30
Figura 5.14 – Gráfico do oscilador quando a fonte dos ultrassons se encontra próxima do recetor esquerdo.....	30

Figura 5.15 – Gráfico do oscilador quando a fonte dos ultrassons se encontra próxima do recetor direito.....	30
Figura 5.16 – Gráfico do oscilador quando a fonte dos ultrassons se encontra à mesma distância dos dois recetores	31
Figura 5.17 – Cabo envolvido com malha metálica	31
Figura 5.18 – Furação das placas PCB e da caixa	32
Figura 5.19 – Montagem das placas PCB na caixa	32
Figura 5.20 – Placas PCB envolvidas em alumínio para garantir bom isolamento	32
Figura 5.21 – Interior do dispositivo	33
Figura 5.22 – Tampa do dispositivo	33
Figura 5.23 – Dispositivo de deteção de fugas desenvolvido.....	33
Figura 5.24 – Ligação tripla de mangueira.....	34
Figura 5.25 – Suporte para os sensores	34
Figura 5.26 – Produto final do projeto	34
Figura 6.1 – Teste para verificar se o produto final funciona.....	35
Figura 6.2 – Gráfico do oscilador quando a fonte dos ultrassons se encontra apontado a uma distância de 1 metro na direção do sensor direito.....	35
Figura 6.3 – Gráfico do oscilador quando a fonte dos ultrassons se encontra apontado a uma distância de 1 metro na direção do sensor esquerdo.....	35
Figura 6.4 – Gráfico do oscilador quando a fonte dos ultrassons se encontra à mesma distância dos dois sensores	36
Figura 6.5 – Teste de uma máquina industrial de corte com disco de diamante	36
Figura 6.6 – Sinais captados pelo dispositivo aquando do teste realizado à máquina industrial de corte com disco de diamante.....	37
Figura 6.7 – Sinais captados pelo sensor esquerdo do dispositivo aquando do teste realizado à máquina industrial de corte com disco de diamante	37
Figura 6.8 – Sinais captados pelo sensor direito do dispositivo aquando do teste realizado à máquina industrial de corte com disco de diamante	37
Figura 6.9 – Furo realizado na mangueira extensiva.....	38
Figura 6.10 – Sinais captados pelo sensor direito do dispositivo desenvolvido aquando do teste realizado com uma mangueira extensiva ligada a 6,3 bar.....	38
Figura 6.11 – Sinais captados pelo sensor esquerdo do dispositivo desenvolvido aquando do teste realizado com uma mangueira extensiva ligada a 6,3 bar	38
Figura 6.12 – Acoplamento motor – bomba de ar para equipamentos de medição de tensão arterial.....	38
Figura 6.13 – Sinais captados pelo sensor esquerdo do dispositivo desenvolvido aquando do teste realizado ao acoplamento motor – bomba de ar para equipamentos de medição de tensão arterial	39

Figura 6.14 – Sinais captados pelo sensor direito do dispositivo desenvolvido aquando do teste realizado ao acoplamento motor – bomba de ar para equipamentos de medição de tensão arterial	39
---	----

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Especificações gerais do detetor de fugas ultrassónico FLEX.US.....	5
Tabela 2.2 - Especificações gerais do detetor de fugas ultrassónico TMULD-300	6
Tabela 2.3 - Especificações gerais do detetor de fugas ultrassónico Whisper	8
Tabela 2.4 - Especificações gerais do detetor de fugas ultrassónico MDE-2000 NC	9
Tabela 2.5 - Especificações gerais do detetor de fugas ultrassónico TMSU 1.....	10

1. Introdução

1.1. Enquadramento do Projeto

Na indústria verifica-se uma constante procura na melhoria da eficiência dos seus equipamentos, visando um aumento da qualidade, redução de custos e consequente incremento do sucesso da empresa.

Para ser possível alcançar o objetivo de aumentar a fiabilidade dos equipamentos é de grande relevância a prevenção atempada de ocorrência de problemas.

Nos últimos anos tem-se vindo a observar um desenvolvimento na aplicação de tecnologias que utilizam ultrassons na deteção de possíveis avarias, tais como fugas. A utilização de deteção ultrassónica proporciona uma melhoria para o processo de manutenção e reparação de equipamentos, bem como uma redução não só do tempo de inatividade dos mesmos, mas também da exposição a eventuais produtos perigosos. Esta tecnologia revela-se rápida, fácil e intuitiva, aumentando a capacidade de qualquer técnico, sem qualquer conhecimento ou formação específica, para localizar onde se encontra a fuga ou deficiência não conforme.

A deteção de fugas de gases por deteção acústica ultrassónica possibilita a captação de qualquer vazamento, em locais onde estes não podem ser observados ou detetados pela audição ou olfato.

Na ocorrência de uma fuga, havendo uma passagem do fluido de uma zona de alta pressão para uma zona de baixa pressão é criada uma turbulência com consequência de rápidas variações de temperatura localizadas. Assim, é gerado um som de alta frequência (ultrassom) que será detetado pelo elemento sensor do dispositivo. De seguida, o equipamento realiza a conversão da banda de elevadas frequências do ultrassom para frequências mais baixas, audíveis pelo ser humano, permitindo que o operador encontre facilmente o local da fuga.

Em geral, estes equipamentos são leves e portáteis, facilitando o seu manuseamento e transporte. Em consequência, estes dispositivos podem ser utilizados numa variedade de locais e aplicações.

1.2. Objetivos do projeto

A realização desta dissertação teve como objetivo o projeto e desenvolvimento de um equipamento que proporcione, ao operador, a capacidade de localizar fugas de gases ou líquidos e também permitir a identificação da fluidez dos mesmos, numa instalação industrial, para além de deteção de avarias internas em elementos constituintes de máquinas, sem contacto ou em opção por contacto direto externo, com as mesmas. Para este fim seriam aplicadas tecnologias de deteção acústica ultrassónica e conversão de frequência. O dispositivo deveria ser sintonizável, via PLL (*Phase Locked Loop*), permitindo a deteção sem contacto visando a segurança do utilizador, para que este não fique exposto a produtos perigosos e ser binaural, tornando o processo de localização da avaria intuitivo.

No final deste projeto deveria ser conseguido um equipamento protótipo de cariz industrial, que possibilite a sua produção em massa a custo reduzido. Para além disso, o dispositivo deveria ser de aplicabilidade multifacetada, com o intuito de facilitar a deteção e prevenção de problemas industriais de fugas, assegurando não só a segurança dos operadores, mas também a localização precisa e eventual caracterização de tipo das avarias.

1.3. Estrutura da dissertação

Para a concretização da presente dissertação foi necessário elaborar uma pesquisa bibliográfica acerca dos diversos conceitos e tecnologias relevantes ao assunto a ser abordado. A segunda etapa consistiu na elaboração do produto a desenvolver.

O primeiro capítulo deste relatório relata uma introdução ao trabalho realizado onde se expõe o enquadramento do projeto e os objetivos pretendidos.

O capítulo 2 contempla uma análise do estado da arte na qual são referidos alguns produtos, com o intuito de realizar uma pequena contextualização quanto ao que existe atualmente na indústria.

No capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica acerca das técnicas e conceitos necessários para a elaboração do projeto em questão.

O quarto capítulo expõe também uma pesquisa bibliográfica relativa a diversos tipos de sensores piezoelétricos visando uma melhor compreensão acerca destes equipamentos, visto serem passíveis de utilização no aparelho a conceber para realizar a captação dos ultrassons. Neste relatório apenas é feita referência acerca deste tipo de sensores, uma vez que são os sensores de maior relevância para o presente projeto. Contudo, existem diversos tipos de sensores, como por exemplo, sensores óticos, sensores magnéticos, entre outros.

No capítulo 5 é referida a solução encontrada para o desenvolvimento do produto, incluindo todos os cálculos e decisões tomadas para a execução do projeto. Este capítulo abrange também uma descrição detalhada acerca de todo o procedimento realizado para a construção do dispositivo pretendido.

No capítulo sexto faz-se referência às experiências realizadas com o aparelho desenvolvido e aos resultados obtidos.

Finalmente, no último capítulo são referenciadas as conclusões relativas aos resultados alcançados no final do projeto e é feita uma breve apreciação do trabalho realizado. Para além disso, são indicadas as possíveis melhorias a realizar no sistema e os trabalhos futuros que possam providenciar a continuidade ao projeto elaborado.

1.4. Contribuições Alcançadas

O dispositivo desenvolvido na presente dissertação revela-se de grande relevância para a melhoria do processo de manutenção de equipamentos industriais. Adicionalmente, o aparelho apresenta características que o tornam útil não só para aplicações em instalações industriais, mas também para outras áreas, como na medicina, na biologia, como por exemplo no estudo de morcegos, entre outras.

Para localizar o local preciso da fonte de uma fuga, com os equipamentos de detecção ultrassônica existentes na atualidade, o utilizador necessita de se ir aproximando deste até o encontrar. Por outro lado, o equipamento desenvolvido nesta tese possibilita a localização precisa da avaria à distância, de forma intuitiva e sem pôr o utilizador em risco de exposição a produtos perigosos.

O assunto tratado neste projeto é bastante interessante e estimulante e proporciona a capacidade de evolução e adaptação às necessidades requeridas. De facto, o equipamento concebido no decorrer desta tese é multifacetado e de grande aplicabilidade.

2. Estado da Arte

2.1. Dispositivos de Detecção de Gases por Detecção Ultrassónica

Atualmente existem, no mercado, variados dispositivos para deteção de diversas avarias recorrendo à deteção ultrassónica, com diferentes características e especificidades.

2.1.1. Detetor de Fugas Ultrassónico FLEX.US

O dispositivo FLEX.US (Figura 2.1) é um instrumento de diagnóstico, resultante da vasta experiência da empresa *SDT International* (Bélgica) em manutenção, deteção de fugas, bem como em controlo de qualidade em vários sectores.

Este equipamento capta ultrassons de altas frequências, utilizando um cristal piezoelétrico sensível como elemento sensor. Aquando da captação das frequências, causadas pela existência de uma fuga, é criado um pulso elétrico, o qual é amplificado e convertido para um som audível pelo operador, através de um par de auscultadores. O utilizador move o dispositivo em várias direções até detetar o som de amplitude mais elevada, onde se encontrará a fonte da fuga.

O FLEX.US pode ser acoplado com um transmissor SDT 200 mW com o intuito de testar volumes fechados, como por exemplo cabines de veículos ou a cabine de piloto de uma aeronave. No entanto, este transmissor é opcional, não vindo incluído com o equipamento. Para guardar e proteger o dispositivo é utilizada uma caixa com espuma no seu interior [1].

O *design* do FLEX.US proporciona grande flexibilidade. No topo do cabo de aço flexível está montado o sensor, que pode, desta forma, aceder a locais de difícil alcance.

Uma vez que é possível dobrar e torcer o cabo, pode-se examinar, de uma forma segura, vários equipamentos e instalações. Este dispositivo possui um controlo de volume, para assegurar o conforto do operador.

Este instrumento é de fácil utilização e funciona com 2 pilhas alcalinas de tamanho AA.

As especificações do equipamento FLEX.US da empresa *SDT International* encontram-se expostas na Tabela 2.1.



Figura 2.1 – FLEX.US da empresa SDT International [1]

Tabela 2.1 - Especificações gerais do detetor de fugas ultrassônico FLEX.US

Especificações gerais	
Temperaturas de operação	-10°C a 50°C
Dimensões	170×42×31 mm
Peso	412 gramas (com a bateria)
Comprimento do tubo flexível	400 mm
Amplificação	7 níveis: 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 dB
Tempo de bateria	Aproximadamente 20 horas
Fonte de energia	2 baterias alcalinas; 1,5V. Também podem ser usadas baterias recarregáveis
Frequências detetadas	38,4 kHz, ± 2 kHz
Preço	891 €

2.1.2. Detetor de Fugas Ultrassônico TMULD-300 com Transmissor Ultrassônico UT-300

Na ocorrência de uma fuga são emitidos ultrassons (tipicamente frequências compreendidas entre 20 kHz e 100 kHz) que não são detetados pelo ouvido humano. O dispositivo TMULD-300 (Figura 2.2), desenvolvido pela empresa *Amprobe* (Alemanha), capta estas frequências ultrassônicas através de um elemento sensor, convertendo-as, posteriormente, em sons audíveis pelo humano [2].

O TMULD-300 pode ser usado para verificar a existência de fugas e localiza-las em linhas de ar pressurizado, sistemas de refrigeração, bem como linhas de vapor. Com este equipamento é possível detetar fugas de uma forma rápida e simples.

Com o intuito de testar áreas com vazamento de gases não suficientemente pressurizados, este equipamento inclui um transmissor ultrassónico, com a designação UT-300. O transmissor pode ser aplicado para testar, por exemplo, selos de portas ou para-brisas. O UT-300 cria ondas de som ultrassónico para detetar fendas ou fugas [3].

As especificações do equipamento TMULD-300 da empresa *Amprobe* encontram-se expostas na Tabela 2.2.



Figura 2.2 – TMULD-300 da empresa *Amprobe* [2]

Tabela 2.2 - Especificações gerais do detetor de fugas ultrassónico TMULD-300

Especificações gerais	
Temperaturas de operação	0°C a 38°C
Temperaturas de armazenamento	-40°C a 66°C
Peso	180 gramas (com a bateria)
Dimensões	185,4×63,5×25,4 mm
Frequência de resposta	35 kHz a 45 kHz + 6 dB
Consumo	22 mA a 9 Volts DC
Tempo de bateria	33 horas com bateria alcalina de 9V (NEDA 1604A, IEC 6LR61)
Performance	De acordo com o <i>standard</i> ASTM: ASTM E1211-07)

Teste de bateria	Indicador LED colorido (verde = bom; vermelho = bateria fraca)
Caixa	<i>High impact ABS plastic</i>
UT-300	
Temperaturas de operação	0°C a 38°C
Temperaturas de armazenamento	-40°C a 66°C
Peso	176 gramas (com a bateria)
Dimensões	165×63,5×25,4 mm
Frequência	40 kHz
Consumo	8,5 mA a 9V
Tempo de bateria	60 horas com bateria alcalina de 9V (NEDA 1604A, IEC 6LR61)
Preço	587 €

2.1.3. Detetor de Fugas Ultrassónico Whisper

O Whisper (Figura 2.3) é um dispositivo da empresa *Inficon* (Estados Unidos da América), utilizado para detetar e localizar frequências ultrassónicas geradas por determinadas avarias.

Este detetor de fugas inclui um recetor especializado, incorporado, que deteta a frequência de 40,5 kHz. O equipamento contém um circuito sofisticado que possibilita a localização da fonte de ultrassons. Para além disso, no seu interior existe um filtro de ruído, o qual assegura que o instrumento não seja afetado pelo ruído presente no ambiente onde este está a ser utilizado.

O equipamento mencionado incorpora uma capacidade heteródina, que converte as frequências ultrassónicas em frequências audíveis. Devido a esta propriedade é possível encontrar o local onde está a ocorrer a avaria. Esta capacidade é ativada quando se liga os auscultadores ao detetor. Adicionalmente, está presente no dispositivo não só um *touch pad* para ajustar a sensibilidade, mas também vários LEDs e um alarme audível de registo de fuga, para o caso de o modo heteródino não estar ativo. Para proteção e armazenamento do dispositivo é utilizada uma caixa dura de plástico [4].

O Whisper pode ser utilizado para detetar fugas de refrigerantes, de nitrogénio, em sistemas pneumáticos ou sistemas de ar comprimido, bem como infiltrações em sistemas de vácuo. Outras aplicações incluem a localização não só de rolamentos gastos, mas também de fugas em volumes fechados, tais como automóveis e caixas refrigeradoras [5].

As especificações do equipamento Whisper da empresa *Inficon* encontram-se expostas na Tabela 2.3.

Figura 2.3 – Whisper da empresa *Inficon* [4]

Tabela 2.3 - Especificações gerais do detetor de fugas ultrassónico Whisper

Especificações gerais	
Temperaturas de operação	0°C a 50°C
Temperaturas de armazenamento	-10°C a 60°C
Peso	680 gramas (com a bateria)
Sensibilidade	Deteta fugas com diâmetros de 0,1 mm a 5 psig ($\approx 34,5$ kPa) a uma distância de 304,8 mm
Humidade	85 % RH NC máximo
Altitude	2000 m
Tempo de bateria	Aproximadamente 165 horas
Fonte de energia	2 baterias alcalinas “D” cell
Nível de poluição	2
Preço	325 €

2.1.4. Dispositivo de Diagnóstico MDE-2000 NC

O dispositivo MDE-2000 NC (Figura 2.4), da empresa *Spectronics* (Estados Unidos da América), incorpora circuitos heteródinos e tecnologia de som (*Sound Signature Technology*), com o intuito de converter ultrassons em sons audíveis, capacitando o diagnóstico de fugas e defeitos.

Este equipamento inclui um *touch pad* de controlo de sensibilidade, bem como um indicador de intensidade com 5 LEDs e um alarme audível para indicar o local exato do problema. Para que o aparelho não seja afetado pelo ruído do ambiente onde se

encontra, este contém um controlo interno de ruído. Para além disso, para aumentar a sensibilidade e simplificar a operação, está presente um circuito de controlo automático de ganho. Uma sonda de ar oca é utilizada para isolar a fonte da fuga em áreas estreitas e uma sonda sólida de contato usa-se para localizar defeitos em componentes internos. No conjunto está incluído, também, um emissor de ultrassons, com o objetivo de detetar vários tipos de defeitos [6].

O equipamento em questão pode ser utilizado em aplicações industriais, em instalações de manutenção, motores e maquinaria, em equipamentos de aquecimento, ar condicionado e em aplicações de refrigeração.

Com o MDE-2000 NC é possível detetar fugas de ar comprimido, gás natural, propano, de vácuo e de refrigerantes. Consegue-se também detetar rolamentos e rodas dentadas gastas, descargas elétricas e turbulência de gases ou líquidos [7].

As especificações do equipamento MDE-2000 NC da empresa *Spectronics* encontram-se expostas na Tabela 2.4.



Figura 2.4 – MDE-2000 NC da empresa *Spectronics* [7]

Tabela 2.4 - Especificações gerais do detetor de fugas ultrassônico MDE-2000 NC

Especificações gerais	
Peso	680 gramas
Sensibilidade	Deteta fugas com diâmetros de 0,1 mm a 5 psig ($\approx 34,5$ kPa) a uma distância de 300 mm
Frequência de resposta	36 kHz a 44 kHz
Tempo de bateria	Aproximadamente 165 horas
Preço	718 €

2.1.5. Detetor de Fugas Ultrassónico TMSU 1

O detetor de fugas ultrassónico TMSU 1 (Figura 2.5), da empresa SKF (Suécia), é um instrumento que possibilita a deteção de fugas de ar, através da captação de ultrassons por elas provocados.

Este equipamento utiliza um cristal piezoelétrico para captar as altas frequências dos ultrassons. De seguida, o dispositivo faz a conversão dos ultrassons em sons audíveis, para que o operador consiga localizar a fuga.

O TMSU 1 inclui, para além do detetor de fugas ultrassónico, um par de auscultadores, um cabo de borracha e pilhas. O conjunto é armazenado numa caixa robusta.

Uma vez que este aparelho apresenta um *design* compacto e leve, torna-o de fácil manuseamento e transporte. Para além disso, a sua utilização permite o melhoramento da sustentabilidade de maquinaria e, visto que o seu sensor está montado no topo do cabo flexível de borracha, possibilita a localização de fugas em áreas de difícil acesso [8].

As especificações do equipamento TMSU1 da empresa SKF encontram-se expostas na Tabela 2.5.



Figura 2.5 – TMSU 1 da empresa SKF [8]

Tabela 2.5 - Especificações gerais do detetor de fugas ultrassónico TMSU 1

Especificações gerais	
Temperaturas de operação	-10°C a 50°C
Amplificação	20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 dB
Peso	412 gramas (com as pilhas)
Sensor ultrassónico	Sensor aberto com 16 mm de diâmetro

Frequências detetadas	38,4 kHz; ± 2 kHz
Dimensões	Corpo: 170×42×31 mm Cabo flexível: 400 mm de comprimento Caixa: 530×110×360 mm
Tempo de bateria	Cerca de 20 horas
Fonte de energia	2 pilhas alcalinas AA; 1,5 V
Preço	1299 €

2.2. Detetores de Morcegos

Os morcegos utilizam a ecolocalização para conseguirem voar no escuro e caçar pequenos insetos, isto é, emitem sinais de frequências extremamente elevadas (aproximadamente de 10 kHz a 200 kHz, sendo ultrassons acima dos 20 kHz) para detetar obstáculos, a sua posição e a que distância se encontram [18].

A utilização de detetores de morcegos possibilita a captação dos sinais ultrassónicos emitidos por estes animais, tornando-os audíveis pelo ser humano, proporcionando a capacidade de detetar a presença de um ou mais morcegos e até mesmo a sua posição [17]. Tendo em conta que cada espécie emite sinais diferentes para a ecolocalização, com estes dispositivos é possível identificar a espécie do morcego detetado. Portanto, estes equipamentos são uma ferramenta de grande relevância para estudar estes mamíferos [15].

Quando um sinal ultrassónico é emitido e transferido pelo ar, este será captado pelo microfone do detetor e convertido num sinal audível. Contudo, existem diversos fatores que poderão influenciar o som resultante, tais como a reflexão do ar, a absorção atmosférica, que provoca a atenuação do som, e também o espalhamento geométrico, que provoca o decréscimo da intensidade do som com o aumento da distância à fonte de emissão do som [14].

A função de um detetor ultrassónico é a conversão de sinais ultrassónicos, de elevadas frequências, para frequências mais baixas, para que possam ser ouvidas pelo ser humano. Para este fim, existem algumas técnicas que podem ser implementadas, sendo as mais comuns a heterodinagem, a divisão de frequência e a expansão de tempo, tendo cada uma destas vantagens e certas limitações. Nesta dissertação apenas vão ser referidas as técnicas de heterodinagem e de divisão de frequência, nos capítulos 3.3 e 3.1.

Um componente muito importante neste tipo de equipamento é o microfone utilizado, que terá de ser sensível a frequências muito elevadas [14]. Existem vários tipos de sensores que podem ser empregados para este fim, no entanto, neste relatório serão apenas mencionados os sensores piezoelétricos.

Sistema de Detecção de Morcegos Anabat II

O detetor de morcegos Anabat II (Figura 2.6) utiliza a tecnologia de divisão de frequência para realizar a conversão de frequências e tem a capacidade de gravar os dados por ele captados, fazendo uso de um microfone ultrassónico e de um *software* de gravação, denominado de Anabat 6.

O microfone incluído neste sistema possibilita a deteção de uma banda de frequências alargada. Para além do modo de gravação, o *software* Anabat 6 possui também um modo de monitorização, no qual a gravação é feita automaticamente de acordo com o critério previamente definido pelo utilizador. Por outro lado, o modo de gravação apenas guarda a informação se indicado manualmente pelo operador.

Este sistema é muito utilizado na Austrália e nos Estados Unidos da América para identificação acústica de morcegos e estudo acerca dos seus habitats [15].



Figura 2.6 – ANABAT II da Titley Electronics (Austrália) [15]

2.3. Conclusão

Os detetores de fugas ultrassónicos existentes atualmente têm como desvantagem o facto de não capacitarem a localização precisa da origem das fugas. Isto é, o operador tem de mover o dispositivo em diversas direções até captar o som de maior amplitude, indo-se aproximando da fonte da fuga até a encontrar. No entanto, no caso de se tratarem de produtos perigosos, o utilizador poderá ficar em perigo.

Por outro lado, os dispositivos disponíveis no mercado apresentam um custo um pouco elevado, podendo não ser muito acessíveis.

Desta forma, é importante desenvolver um equipamento deste género que proporcione a capacidade de localizar avarias à distância e que seja de custo reduzido.

3. Fundamentos Teóricos

3.1. Divisão de Frequência

Divisão de frequência é uma técnica que pode ser utilizada em detetores ultrassônicos para realizar a conversão de frequências ultrassônicas em frequências audíveis pelo ser humano. Esta conversão é feita dividindo a frequência recebida por um valor previamente estabelecido no detetor, transformando os ultrassons detetados em sons audíveis [15].

Ao contrário da heterodinagem, que apenas transforma uma banda limitada de frequências em sons audíveis, com a técnica de divisão de frequência todas as frequências detetadas são convertidas [14]. No entanto, isto pode ser desvantajoso visto que, sendo todo o sinal convertido, o som resultante torna-se confuso e difícil de identificar e interpretar por parte do utilizador [16]. Por outro lado, uma vez que o sinal resultante contém muita informação, esta técnica revela-se bastante útil para certas aplicações de análise de som.

Tendo em conta que um circuito de divisão de frequência requer de poucos componentes para realizar a sua função, este mostra-se relativamente estável, pois desta forma existe um menor número de pontos onde poderão ocorrer falhas. Para além disso, o facto de esta técnica ter a capacidade de monitorizar toda a informação recebida, esta apresenta-se vantajosa, por exemplo, em detetores de morcegos. Isto porque assim existe uma menor probabilidade de não detetar a presença de outros morcegos que se encontrem nessa área [16].

Quando o sinal é recebido por um detetor provido desta tecnologia, ele é transformado numa onda quadrada, independentemente da sua forma original. Contudo, isto provoca a perda de informação relativa à amplitude nos sinais de saída, o que dificulta, por exemplo, a determinação da frequência com maior intensidade. Para além disso, estes detetores apresentam um limite mínimo de operação, abaixo do qual não conseguem gerar nenhum sinal de saída, apresentando assim menor sensibilidade do que detetores que utilizam a técnica da heterodinagem.

Existem algumas especificações relevantes quando se utiliza a técnica de divisão de frequência, como a capacidade de seleccionar a razão de divisão a utilizar, pois isto possibilita o ajuste da resolução do detetor para as bandas de frequências desejadas. Por exemplo, quando se está a operar com frequências mais baixas pode-se estabelecer a razão de divisão para 8:1 ou 4:1. No caso contrário, ter-se-ia de estabelecer uma razão de divisão mais elevada [16]. É também importante o uso de um ajuste de sensibilidade, que possibilita o estabelecimento do limite mínimo de operação do detetor de acordo com as especificações pretendidas.

3.2. Recetor Superheteródino

O recetor superheteródino serve como modelo para explicar o funcionamento da maioria dos recetores, tendo como objetivo a conversão de radiofrequências, mais

conhecidas pela sigla RF, numa única frequência intermédia (ou IF do inglês *intermediate frequency*).

Na Figura 3.1 está demonstrado o diagrama de blocos do recetor em questão. Inicialmente, o sinal RF é captado por meio de uma antena, passando por circuitos de sintonização e amplificação (A, B e C). De seguida, dá-se o processo de heterodinagem, que se trata da conversão das frequências RF para IF, misturando o sinal RF recebido com o sinal de um oscilador local (E). O sinal IF resultante é, então, amplificado por amplificador IF, que consiste, basicamente, num amplificador RF sintonizado a uma única frequência, sendo uma porção do sinal utilizado na secção de controlo de ganho automático (M e L). Esta secção inclui um retificador e um filtro de oscilações de tensão (*ripple filter*) e serve para produzir uma tensão de controlo DC que, por sua vez, é aplicada nos amplificadores RF e IF para atenuar as variações no nível do sinal de saída. Para além disso, outra porção do sinal IF passa por um detetor (I) que realiza a desmodulação do sinal RF e recupera qualquer informação que possa ter sido perdida ao longo do processo. Por fim, as últimas fases (J e K) proporcionam a amplificação e transmissão do sinal.

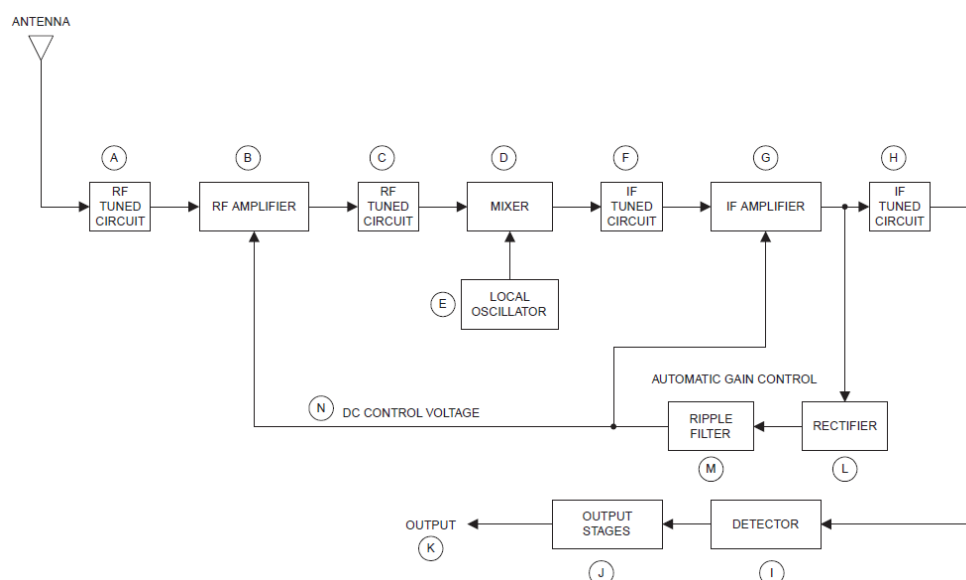


Figura 3.1 – Diagrama de blocos do recetor superheteródino [9]

3.3. Heterodinagem

A heterodinagem é uma técnica de conversão de frequências de banda estreita, ou seja, apenas é feita a conversão de uma porção das frequências captadas.

A determinação da porção da banda de frequências a ser transformada é feita através de um filtro e de um sintonizador. Isto é, o sintonizador estabelece uma frequência de referência que indica o centro da banda de frequências a converter, enquanto que o filtro determina a largura dessa faixa de frequências [14]. Por exemplo, se se pretende uma banda de frequências de 20 kHz centrada a 40 kHz, isto significa que as frequências detetadas com valores compreendidos entre os 30 kHz e os 50 kHz serão convertidas num sinal audível pelo ser humano.

No processo de heterodinagem está incluído um oscilador, cuja frequência, f_O , é ajustada por um sintonizador, passando esta a ser misturada com a frequência do sinal ultrassônico recebido, f_{IN} . Deste processo resulta um sinal constituído por duas componentes, $f_{IN} - f_O$ e $f_{IN} + f_O$. De seguida, o sinal resultante é processado por um filtro passa-baixo, que remove a componente $f_{IN} + f_O$. Consequentemente, da diferença $f_{IN} - f_O$ resulta um sinal audível.

3.4. Oscilador Local

O oscilador local trata-se de um circuito elétrico, normalmente utilizado em recetores superheteródinos, com o intuito de converter radiofrequências, RF, numa frequência intermédia, IF. Por outro lado, este circuito pode também ser aplicado em equipamentos detetores para converter os sinais IF em sinais áudio.

Para evitar a ocorrência de problemas no recetor em que está incluído, o oscilador local deverá ser espectralmente puro. Para além disso, no caso de recetores de frequência variável, o oscilador deve ter a capacidade de alterar a sua frequência rapidamente, bem como providenciar incrementos de frequência pequenos. Em geral, a resolução de frequência destes circuitos é de 1 a 100 Hz, abaixo dos 30 MHz.

São conhecidos três tipos de osciladores locais: Oscilador de Frequência variável (do inglês *Variable Frequency Oscillator* ou VFO), Oscilador de Cristal e Sintetizador de Frequência.

3.4.1. Oscilador de Frequência Variável

Este tipo de oscilador, conhecidos por VFOs, pode ser utilizado como gerador de sinal em equipamentos de teste, para controlar transmissores e até mesmo como osciladores locais não só em recetores superheteródinos, mas também em recetores de conversão direta.

Os VFOs podem ser continuamente sintonizados, o que os diferencia dos osciladores de cristal, que são geralmente de frequência fixa. No entanto, por se tratar de um oscilador sintonizável, existe a possibilidade de a sua estabilidade não ser assegurada.

3.4.2. Oscilador de Cristal

Na montagem de osciladores de radiofrequência podem ser utilizados diversos tipos de ressoadores. Contudo, consegue-se alcançar uma melhor precisão e estabilidade com ressoadores de cristal. Embora o oscilador de cristal providencie um bom desempenho, como já foi anteriormente referido, trata-se de oscilador de frequência fixa, uma vez que a oscilação dá-se à frequência de ressonância do cristal. Portanto, para alterar a frequência é necessário trocar de cristal. Para além disso, o cristal piezoelétrico tipicamente aplicado em circuitos de radiofrequência é o quartzo.

Contudo, é necessário tomar em consideração o facto de que alguns cristais podem entrar em curto-circuito por perfuração electrostática, sobre aquecimento de soldadura ou vibração mecânica quando montados em placas de circuito impresso, também designadas por PCB do inglês *Printed Circuit Board*. Visando a prevenção deste problema é utilizado um isolador entre a PCB e o cristal, como se pode observar na Figura 3.2.

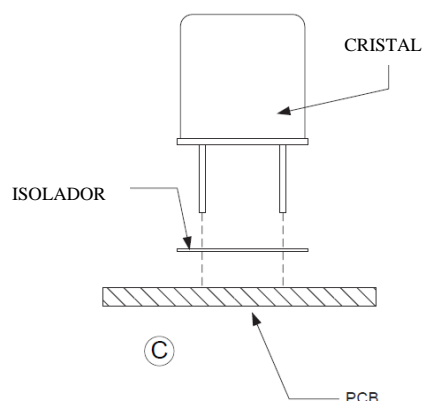


Figura 3.2 – Utilização de isolador para montagem do cristal num PCB [9]

3.4.3. Sintetizadores de Frequência

Atualmente, em recetores RF, o oscilador é geralmente utilizado como um sintetizador de frequência. Estes sintetizadores, para além de serem sintonizáveis, providenciam sinais com boa estabilidade, precisão e qualidade.

Para garantir a qualidade do sinal de saída pretendido é de grande relevância especificar as propriedades do sintetizador, tais como a resolução e gama de frequências, o erro máximo de frequência, o tempo de estabilização, a distorção harmónica, o método de indicação de frequência, entre outras.

Na Figura 3.3 está exposto um diagrama de blocos de um sintetizador. A secção de referência (secção A) é uma fonte de frequência fixa de elevada precisão, podendo ser, por exemplo, um oscilador de cristal. Tendo em conta que esta secção controla o sintetizador de frequência, é de grande importância a sua estabilidade, uma vez que será esta que determinará a estabilidade do processo de geração do sinal. Visto que, em muitos casos são requeridas frequências baixas, para se alcançar um valor mais baixo de frequência de referência é utilizado um divisor digital *divide-by-N* (divisor por N).

Para além disso, na Figura 3.3 observa-se um conector REF.OUT, que providencia o sinal de referência a outros instrumentos ou pode ser usado para calibração, bem como um conector EXT.REF.IN, que possibilita a utilização de uma fonte de referência externa, quando se pretende, por exemplo, interligar dois geradores de sinal. Na secção do sintetizador de frequência (secção B) encontra-se um oscilador controlado por tensão ou VCO (*voltage controlled oscillator*) que reproduz o sinal, sendo a sua frequência estabelecida por uma tensão de controlo DC. O sinal resultante do VCO passa por um divisor *divide-by-N*, sendo posteriormente comparado com a frequência de referência através de um detetor ou comparador de fase. Para além disso, a tensão de controlo acima mencionada é definida pela integração do sinal proveniente

no detetor de fase. Por fim, se as duas frequências comparadas forem iguais, o sinal de saída do detetor de fase tomará o valor de zero, ficando a tensão de sintonização de VCO em repouso. Caso contrário, a frequência do VCO será constantemente corrigida para que se aproxime do valor da frequência de referência. Quando isto ocorre, obtém-se a sintonia pretendida, está-se perante um circuito *Phase Locked Loop*, tema que será exposto no capítulo 3.3.

A secção de *output* (secção C) tem como objetivo aumentar a potência do sinal de saída para um determinado nível máximo, proporcionar controlo de precisão do nível do sinal gerado e manter o nível do sinal constante à medida que a frequência varia.

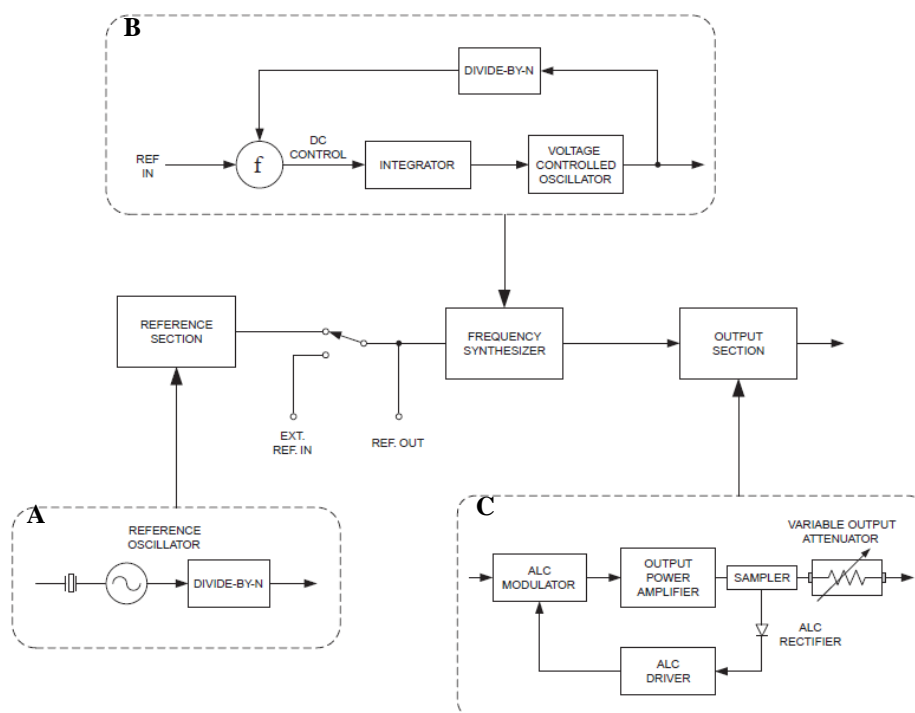


Figura 3.3 – Diagrama de blocos de um sintetizador de frequência [9]

3.5. *Phase Locked Loop*, PLL

O *Phase Locked Loop*, usualmente denominado por PLL, consiste num sistema de controlo de anel fechado, considerado de grande interesse e utilidade.

Em 1918, o cientista Edwin Howard Armstrong criou um sistema designado por Superheteródino [10]. Em 1932, um grupo de cientistas britânicos procurou melhorar o referido sistema. Nesse sentido, foi desenvolvido um recetor formado por um oscilador local, um misturador e um amplificador de áudio denominado, inicialmente, por *Heterodyne* e, mais tarde, por *Synchrodyne*. Este sistema teve por objetivo a criação de uma representação de áudio exata do sinal portador modulado, tendo em conta que o sinal de entrada e o oscilador local fossem misturados com a mesma fase e frequência. No entanto, constatou-se a ocorrência de um pequeno desvio da frequência do oscilador local, provocando dificuldades na receção sincronizada. Para solucionar este problema foi utilizado um detetor de fase para efetuar a comparação entre a frequência do oscilador local e o sinal de entrada, tornando possível a correção da tensão de controlo

no retorno ao oscilador local, mantendo-o em frequência. Na sequência destes desenvolvimentos, surgiu o atual PLL [10].

No início, o PLL foi essencialmente aplicado na sincronização de osciladores em recetores de televisão proporcionando a transmissão de impulsos sincronizados. Posteriormente, esta técnica estendeu-se a outras aplicações, tais como desmodulação FM (frequência modulada) ou AM (amplitude modulada), descodificação FSK (*frequency-shift keying* ou modulação por chaveamento de frequência), controlo de velocidade de motores, aplicações na ótica, entre outras.

O PLL contém um detetor de fase, um filtro passa-baixo e um VCO (*voltage-controlled oscillator*).

O funcionamento do sistema PLL pode ser observado no diagrama de blocos ilustrado na Figura 3.4. O VCO gera um sinal que é inserido no detetor de fase. O detetor de fase recebe também um sinal de referência e compara a frequência deste, f_{ref} , com a frequência do sinal produzido pelo VCO, f_{vco} . De seguida, é gerado um sinal de saída que consiste no valor da diferença entre as fases dos sinais supramencionados. O sinal resultante é então processado por um filtro passa-baixo, voltando a ser reintroduzido no VCO. Este sinal serve como controlo de tensão para o VCO, tendo como intuito reduzir a diferença entre as duas frequências em questão, f_{vco} e f_{ref} . Inicialmente, o ciclo (*loop*) encontra-se aberto. Contudo, à medida que a correção de tensão vai sendo aplicada no VCO, f_{vco} vai-se aproximando de f_{ref} até chegar a uma diferença de valor nulo entre os dois sinais. Quando isto ocorre o ciclo fica então fechado (*locked*). O sinal de saída do sistema, f_{out} , é realizado pelo VCO.

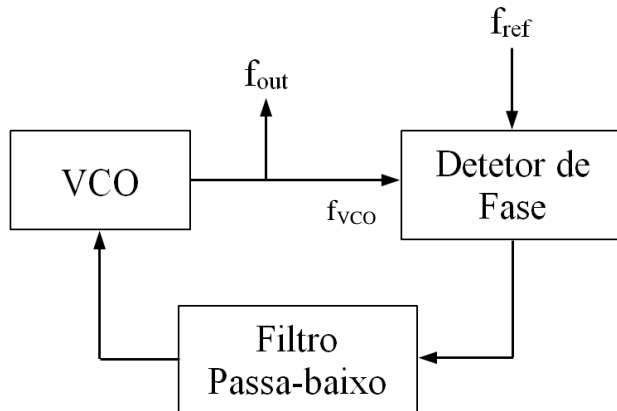


Figura 3.4 – Diagrama de blocos de um PLL

4. Sensores Piezoelétricos

No final do século XIX, Pierre e Jacques Curie descobriram que certos minerais, como a turmalina e o quartzo, têm a capacidade de transformar energia mecânica num sinal elétrico e vice-versa. Isto é, quando um destes cristais é deformado mecanicamente gera-se potencial elétrico. Este fenómeno denomina-se efeito piezoelétrico. Com o intuito de explicar este efeito, na Figura 4.1 é possível observar um voltímetro, centrado em zero, ligado a uma barra de cristal. Em A verifica-se que o potencial elétrico entre as superfícies da barra é nulo, estando esta em repouso. Por outro lado, em B observa-se que a barra se encontra deformada no sentido ascendente, apresentando um potencial positivo. Verifica-se o contrário em C, sendo o potencial elétrico na superfície do cristal negativo [9].

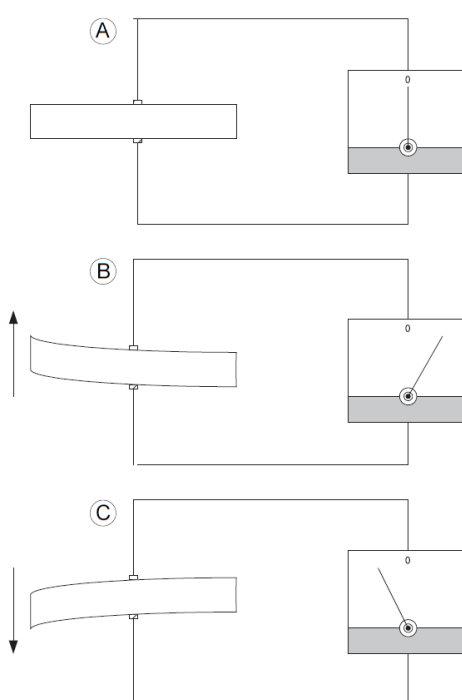


Figura 4.1 – Demonstração do efeito piezoelétrico [9]

Sensores piezoelétricos têm como funcionalidade a conversão de energia mecânica para energia elétrica. Isto é, quando ocorre a incidência de ondas sonoras sobre o cristal do sensor, este vibra à frequência de oscilação recebida, produzindo uma polarização alternada, criando um potencial elétrico. Contudo, a amplitude de oscilação do cristal será máxima quando a frequência exterior nele aplicada for igual à sua frequência de ressonância [11].

Estes sensores podem ser utilizados em medições de flexão, de toque, de vibrações e de choque. Para além disso, as suas propriedades permitem a modificação da resposta ou redução de ruído ou vibrações, o que se revela de grande importância, uma vez que vibrações e choque podem encurtar o tempo de vida de um sistema eletrónico ou eletromecânico [12].

Os sensores mencionados quando encapsulados são insensíveis a campos elétricos e à radiação eletromagnética. Adicionalmente, apresentam uma excelente linearidade numa vasta faixa de temperaturas e de amplitudes, pelo facto de quase não exibirem deflexão, visto que têm a capacidade de produzir um sinal elevado usufruindo de muito pouca corrente. Estas características tornam estes sensores ideais em ambientes adversos.

O quartzo cristalino é um dos mais sensíveis e estáveis materiais piezoelétricos disponíveis. O quartzo apresenta elevada sensibilidade de tensão, rigidez comparável com o aço, bem como excelente estabilidade a longo prazo [13].

4.1. Estrutura e Configuração de Sensores Piezoelétricos

Os sensores em questão podem ser distinguidos quanto à sua estrutura, podendo ser sensores de força, de pressão ou acelerómetros (Figura 4.2). Contudo, não se verificam grandes diferenças quanto às suas configurações internas.

De facto, os sensores de força e de pressão são bastante parecidos, tendo como maior diferença o facto de os de pressão utilizarem um diafragma. Para além disso, ambos necessitam de uma força externa para a deformação do cristal.

No caso dos acelerómetros, a força aplicada nos seus cristais varia de forma rápida. A força resultante pode ser calculada pela segunda lei de Newton, que resulta da multiplicação da aceleração com o valor da sua massa sísmica previamente conhecida ($F=m \times a$).

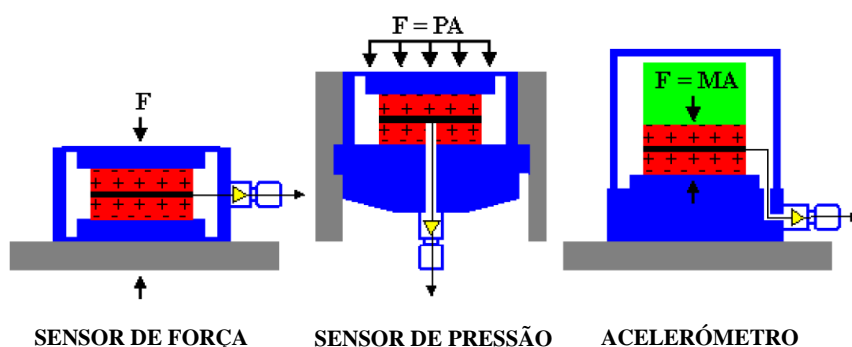


Figura 4.2 – Tipos de estrutura que o sensor piezoelétrico pode assumir [13]

Os sensores baseados no efeito piezoelétrico podem apresentar diferentes configurações, isto é, podem operar através de forças de compressão, flexão ou cisalhamento (Figura 4.3).

A configuração por compressão apresenta elevada rigidez o que a torna muito útil para implementação em sensores de pressão de alta frequência e sensores de força. Contudo, revela sensibilidade a alterações térmicas transitórias.

A configuração por flexão é bastante simples e é utilizada para bandas de frequências estreitas.

A configuração de cisalhamento é utilizada sobretudo em acelerômetros, uma vez que oferece uma vasta faixa de frequências e sensibilidade reduzida à tensão de base e a potências térmicas [13].

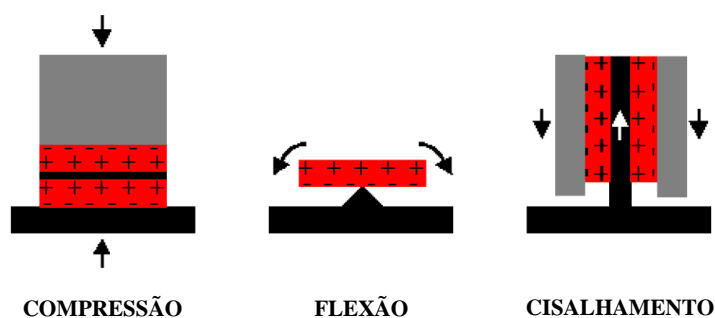


Figura 4.3 – Configurações possíveis para o material piezoelétrico [13]

4.2. Transdutores Piezoelétricos

Transdutores são equipamentos com a capacidade de emitir ondas sonoras, fazendo a conversão de energia elétrica em mecânica ou de detetar sinais sonoros, realizando o inverso. Neste último caso, trata-se de sensores.

Transmissão e Reflexão de Ondas

Consideremos dois elétrodos alojados nas faces, frontal e posterior, de um transdutor piezoelétrico. Quando uma diferença de potencial é aplicada nesses elétrodos, o material piezoelétrico sofre uma deformação provocando a produção de energia que é libertada para o meio adjacente às faces do transdutor.

Na ocorrência do fenómeno acima mencionado, a face frontal começa a vibrar dando origem a duas ondas de tensão mecânica que se propagam perpendicularmente à face. Uma onda direciona-se para o meio exterior enquanto a outra apresenta o sentido oposto viajando no interior do transdutor até à face posterior onde se dá a reflexão da onda, que regressa então para a face frontal voltando a realizar o mesmo ciclo. Como consequência, a onda refletida fica desfasada da onda original. Todo este processo ocorre da mesma forma, mas tendo início na face posterior.

Conclui-se então que a forma apresentada pela onda sonora transmitida para o meio resulta da reflexão das ondas de tensão mecânicas supramencionadas.

Quando uma onda sonora atravessa dois meios distintos que apresentam os mesmos valores de impedâncias características, se não houver refração resultante de uma possível alteração de velocidade ou de incidências não perpendiculares, essa onda propaga-se sem sofrer alterações. Por outro lado, no caso de dois materiais com impedâncias diferentes, a onda é repartida em duas ondas, uma transmitida e outra

refletida pela fronteira entre os dois materiais, como se pode observar na Figura 4.4 [11].

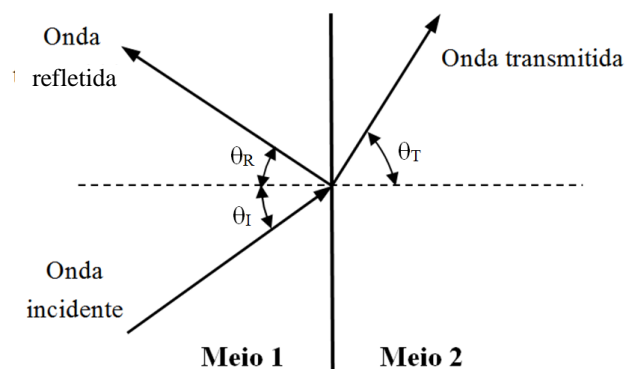


Figura 4.4 – Transmissão e reflexão de uma onda sonora na fronteira entre dois meios distintos

5. Projeto e Desenvolvimento

O dispositivo final, como foi previamente referido, deveria ser binaural, ou seja, será utilizado um sistema de reprodução de dois canais de som distintos, direito e esquerdo, tornando a localização de avarias num processo intuitivo. Portanto, foram concebidas duas placas PCB, cada uma ligada a um sensor. Adicionalmente, o produto final contempla também um par de auscultadores, estando o auscultador direito conectado à saída de uma placa PCB e o esquerdo à saída da outra. Desta forma é possível obter o efeito de binauralidade pretendido.

Um fator de grande relevância é a seleção do tipo de sensores a utilizar. Visto que se pretende conseguir uma deteção à distância, bem como a captação de frequências acima dos 20 kHz, concluiu-se que o melhor tipo de sensores a utilizar seriam os piezoelétricos, pois apresentam elevada sensibilidade, isto é, dispõem de uma gama de frequências com uma largura de banda que vai dos 20 kHz a mais de 10 GHz.

5.1. Parte Eletrónica do Projeto

A primeira etapa a realizar, para o desenvolvimento do equipamento pretendido, consistiu no estabelecimento do circuito a ser implementado. Para tal, foi necessário escolher qual o sistema de conversão de frequências que proporcionaria o melhor desempenho por parte do circuito a ser elaborado. Após deliberação chegou-se à conclusão que se iria utilizar o circuito integrado PLL, CD 4046¹, uma vez que circuitos integrados da série 4000 podem ser utilizados com tensões de alimentação até aos 18 V e, especificamente, o CD 4046 é o único integrado desta série que funciona como PLL. Uma das vantagens deste circuito integrado é o facto de incluir várias funções num só encapsulamento de integrado DIP 16, o que contribui para que o sistema a implementar seja mais compacto. Para além disso, este apresenta um consumo de energia muito baixo, consegue operar numa largura de banda de frequências até os 1,4 MHz e proporciona uma tensão de saída que responde rapidamente a variações de frequência, entre outras vantagens. As especificações do circuito integrado CD 4046 podem ser observadas na sua *data sheet* (ficha de características do fabricante) no anexo.

Na Figura 5.1 está exposto um diagrama de blocos que serve para explicar como funciona o circuito elaborado. Portanto, o microfone (MIC) capta os sinais ultrassónicos que passam depois por uma pré-amplificação e filtragem de ruído. De seguida, é feita a comparação do sinal e sintonia através do PLL (circuito integrado de controlo de frequência) sendo o sinal de entrada convertido para a largura de banda audível. O sinal resultante é então amplificado e enviado para os auscultadores (OUT), conseguindo assim o utilizador ouvir, na gama audível, as características do sinal a ser captado e analisado.

¹ A ficha de dados do circuito integrado CD 4046 pode ser obtida através do site seguinte: <http://www.datasheet4u.com/datasheet-pdf/TexasInstruments/CD4046/pdf.php?id=109068>

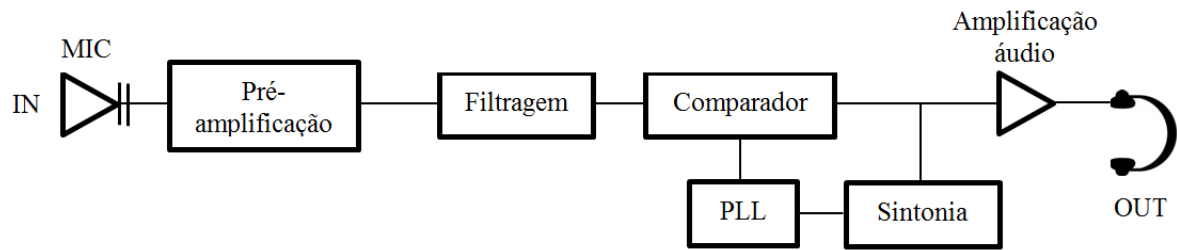


Figura 5.1 – Diagrama de blocos do circuito

Desta forma, procedeu-se então com a elaboração do circuito representado na Figura 5.2.

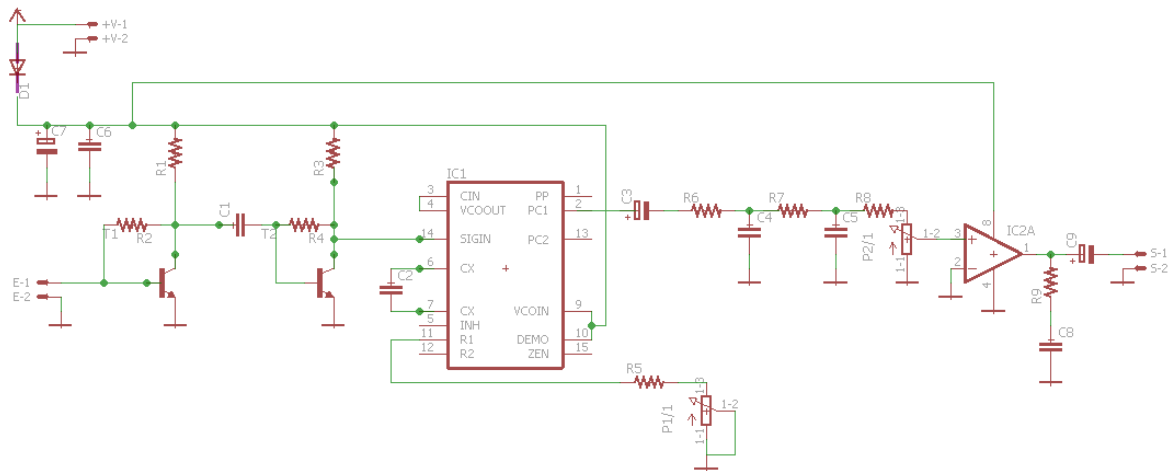


Figura 5.2 – Circuito elaborado no programa EAGLE

Na Figura 5.3 está representado o *Layout* da placa PCB obtido no programa EAGLE.

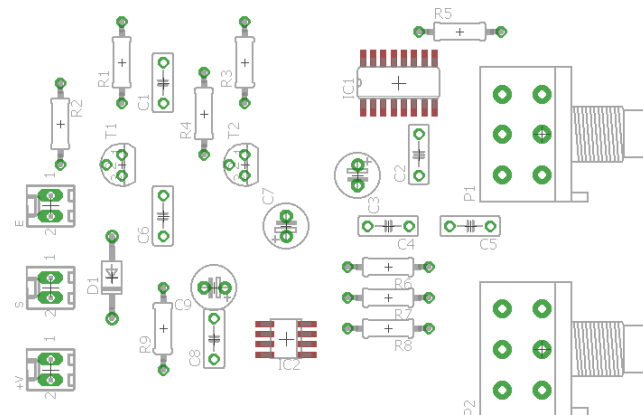


Figura 5.3 – Posicionamento dos componentes para a placa PCB (*Layout*)

5.2. Suporte para os Sensores

Um dos objetivos desta dissertação foi conseguir que o dispositivo desenvolvido seja multifacetado. Consequentemente, foi importante encontrar uma solução para que a forma como estão dispostos os sensores possibilite a detecção de avarias nos mais diversos tipos de equipamentos. Portanto, o suporte para os sensores tem três partes amovíveis oferecendo a possibilidade de afastar os dois sensores e encosta-los à zona a testar, por exemplo, quando se pretende verificar se existe alguma fuga no interior de um motor, estudar a fluidez dentro de um tubo ou até mesmo averiguar se há alguma avaria numa válvula no interior de uma central hidráulica. A terceira parte amovível permite um suporte, fixo no chão, o que proporciona a liberdade das duas mãos do utilizador para manobrar por exemplo as tarefas de aquisição de dados por parte de um computador, dado que o equipamento, para além do mais, também possui uma saída em tempo real, específica para esse fim. Quando for pretendido detetar fugas à distância os sensores deverão estar devidamente acoplados no seu suporte a uma distância devidamente calculada. No processo de conceção do suporte foi necessário calcular qual a distância a que os sensores se deverão encontrar para realizar uma captação adequada. Os cálculos efetuados estão apresentados a seguir.

Pelo Teorema da Amostragem sabe-se que:

$$f_s = 2 \times f_a$$

Sendo f_s a frequência de amostragem e f_a a frequência a amostrar. Então teremos:

$$\lambda f_s = 2 \times \lambda f_a \Leftrightarrow \lambda f_a = 0,5 \times \lambda f_s$$

Sendo λf_s o comprimento de onda da frequência de amostragem e λf_a o comprimento de onda da frequência a amostrar. Desta forma, os sensores terão, idealmente, de estar distanciados de múltiplos, não inteiros, de 0,5 vezes o comprimento de onda (λ , Figura 5.4), por forma a melhorar a capacidade de direcionamento do equipamento.

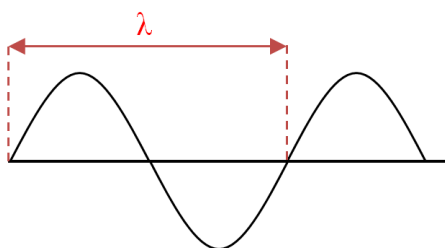


Figura 5.4 – Comprimento de onda

Tendo em conta que os sensores utilizados têm uma frequência de sintonia de 40 kHz é possível calcular o período de onda da seguinte forma:

$$f = \frac{1}{T} \Leftrightarrow 40 \text{ kHz} = \frac{1}{T} \Leftrightarrow T = \frac{1}{40 \times 10^3 \text{ Hz}} \Leftrightarrow T = 25 \times 10^{-6} \text{ s} \Leftrightarrow T = 25 \mu\text{s}$$

Sabendo que a velocidade do som é de aproximadamente 343 m/s, vem que:

$$\lambda = v \times T \Leftrightarrow \lambda = 343 \times 25 \times 10^{-6} \Leftrightarrow \lambda = 8575 \times 10^{-6} \text{ m} \Leftrightarrow \lambda = 8,575 \text{ mm}$$

$$\frac{\lambda}{2} \approx 4,29 \text{ mm}$$

Os sensores usados têm 10 mm de diâmetro, ou seja, como se pode ver na Figura 5.5, se os dois sensores estiverem encostados, a distância entre os seus centros é também de 10 mm. Portanto, por imposições de ordem construtiva e física, eles têm de estar afastados de mais de 10 mm, por isso a distância terá de ser de pelo menos $3 \times \frac{\lambda}{2}$ ($3 \times 4,29 = 12,87 \text{ mm} > 10 \text{ mm}$), ou seja, mais ou pouco menos de 1,5 vezes o comprimento de onda, desde que não seja um número inteiro.

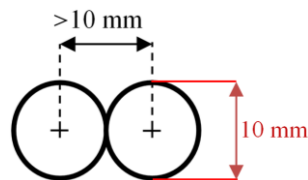


Figura 5.5 – Dimensões dos sensores

Considerando que se pretende, por opção construtiva e estética, que a distância (d) entre os sensores seja 160 mm. Vamos então verificar se é possível utilizar esta medida:

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{160}{8,575} \approx 18,6$$

Ou seja, com uma distância de 160 mm equivale a aproximadamente 18,6 comprimentos de onda entre os dois sensores, o que se revela perfeitamente aceitável.

Tomando em consideração que se pretende captar frequências com pelo menos 20 kHz e considerando um máximo de 100 kHz será agora fundamental realizar os mesmos cálculos para estes dois extremos, com o intuito de verificar se uma distância de 160 mm entre os sensores é aceitável.

Para 20 kHz:

$$f = \frac{1}{T} \Leftrightarrow 20 \text{ kHz} = \frac{1}{T} \Leftrightarrow T = \frac{1}{20 \times 10^3 \text{ Hz}} \Leftrightarrow T = 50 \times 10^{-6} \text{ s} \Leftrightarrow T = 50 \mu\text{s}$$

$$\lambda = v \times T \Leftrightarrow \lambda = 343 \times 50 \times 10^{-6} \Leftrightarrow \lambda = 17150 \times 10^{-6} \text{ m} \Leftrightarrow \lambda = 17,15 \text{ mm}$$

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{160}{17,15} \approx 9,3$$

Para 100 kHz:

$$f = \frac{1}{T} \Leftrightarrow 100 \text{ kHz} = \frac{1}{T} \Leftrightarrow T = \frac{1}{100 \times 10^3 \text{ Hz}} \Leftrightarrow T = 10 \times 10^{-6} \text{ s} \Leftrightarrow T = 10 \mu\text{s}$$

$$\lambda = v \times T \Leftrightarrow \lambda = 343 \times 10 \times 10^{-6} \Leftrightarrow \lambda = 3430 \times 10^{-6} \text{ m} \Leftrightarrow \lambda = 3,43 \text{ mm}$$

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{160}{3,43} \approx 46,5$$

Visto que frequências de 100 kHz são bastante mais difíceis de captar pelos aspetos elétricos e construtivos inerentes aos sensores a utilizar, os resultados obtidos para este valor são os mais relevantes. Uma vez que o resultado conseguido para 100 kHz foi ótimo, isto é, utilizando uma distância de 160 mm consegue-se aproximadamente 46,5 comprimentos de onda entre os dois sensores, pode-se concluir que é adequado empregar uma distância de 160 mm entre os sensores.

5.3. Desenho para a Tapa da Caixa

Foi necessário elaborar um desenho apelativo, explicativo, intuitivo e funcional, fazendo uso do programa *Microsoft Visio*, para a tampa da caixa do dispositivo a desenvolver. Na tampa, tal como se pode observar no desenho da Figura 5.6, estão montadas três fichas painel destinadas a realizar a ligação dos canais de entrada e saída, um interruptor ON/OFF para ligar e desligar o aparelho, um LED de indicação (*Power*) para quando o equipamento está ligado e dois potenciômetros.

Atribui-se o nome de BANDET ao dispositivo sendo esta uma abreviação para *Binaural Audio Non Contact Defect Detector*, que em português significa Detetor de Defeitos sem Contacto Binaural Audio.

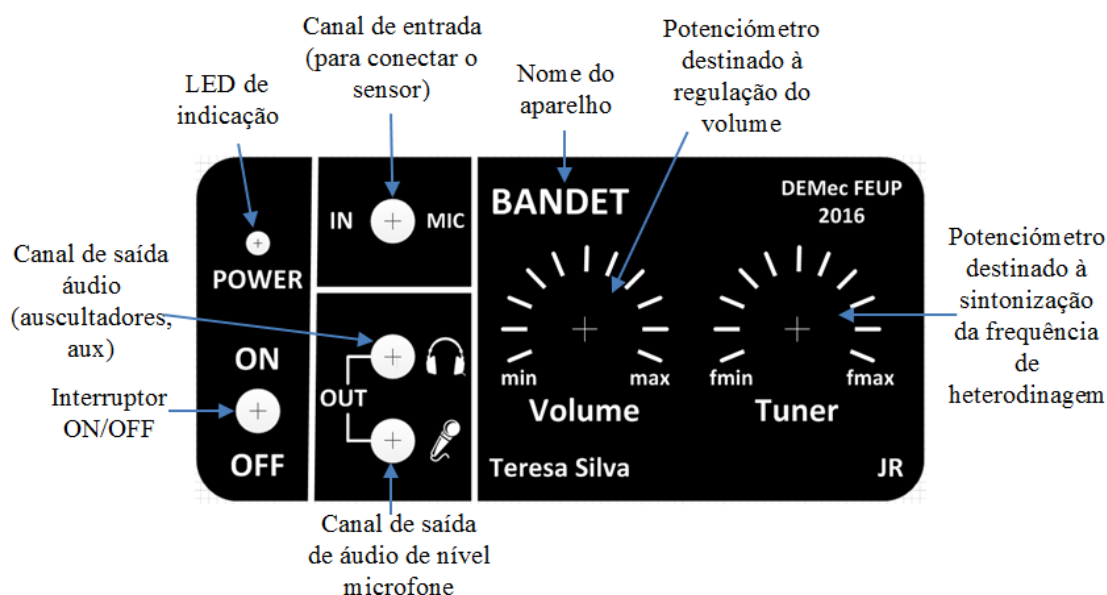


Figura 5.6 – Desenho concebido no programa *Microsoft Visio* para a tampa da caixa do dispositivo

5.4. Desenvolvimento

A primeira etapa do desenvolvimento do equipamento a construir constou na elaboração do circuito a implementar, com o intuito de conceber uma placa PCB (Figura 5.7). Após confeccionada a placa procedeu-se à montagem dos componentes eletrónicos de acordo com o circuito desenvolvido, como está exposto na Figura 5.8.

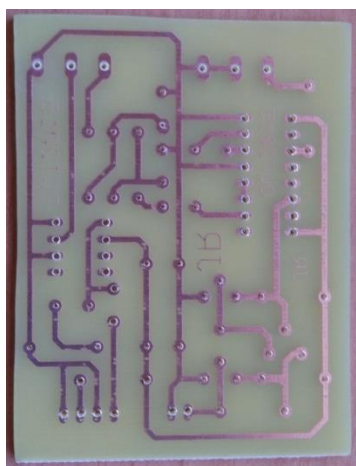


Figura 5.7 – Placa de circuito impresso (PCB)



Figura 5.8 – Placa PCB com os componentes montados

Com a primeira placa concluída foi possível testá-la, tendo em vista verificar se o circuito concebido servia para obter os objetivos pretendidos. Para isso, foi utilizado um transmissor ultrassónico ligado a um gerador de frequências de diversas formas de onda (HP 33120A). Ligou-se um altifalante à placa para ser possível a audição por parte do utilizador humano dos sons resultantes da conversão dos ultrassons captados e conectou-se também um sensor piezoelétrico à placa para realizar a captação dos

ultrassons produzidos pelo transmissor, como está representado na Figura 5.9. Para além disso, o sensor foi ligado a um osciloscópio (HP 54600A) para proporcionar a visualização dos sinais por este recebidos.

Na concretização desta pequena experiência conseguiu-se detetar e converter sinais com frequências até os 110 kHz, o que se revelou um resultado excelente. Isto pode ser verificado na Figura 5.10 e na Figura 5.11. Concluiu-se então que o circuito desenvolvido supera as capacidades para o objetivo em vista. Portanto, seguiu-se com a conceção da segunda placa PCB tal como foi feito para o primeiro caso.

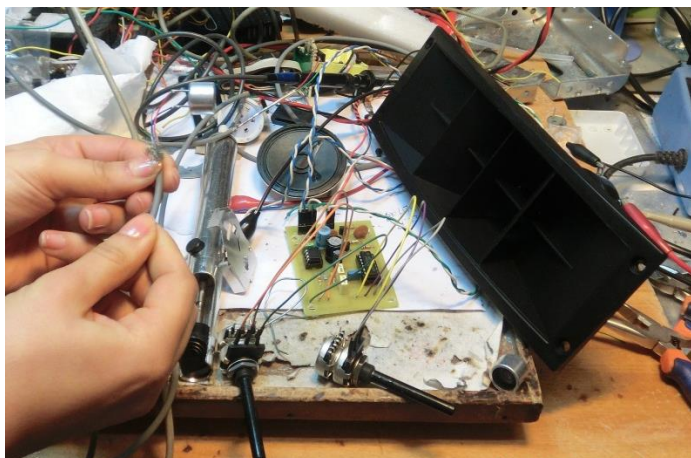


Figura 5.9 – Teste realizado à primeira placa PCB para verificar se o circuito funciona de acordo com o pretendido

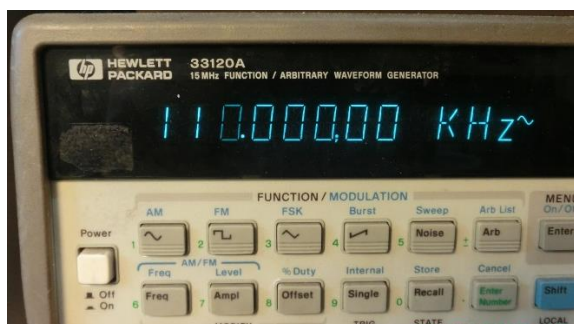


Figura 5.10 – Gerador de frequências de diversas formas de onda a gerar 110 kHz

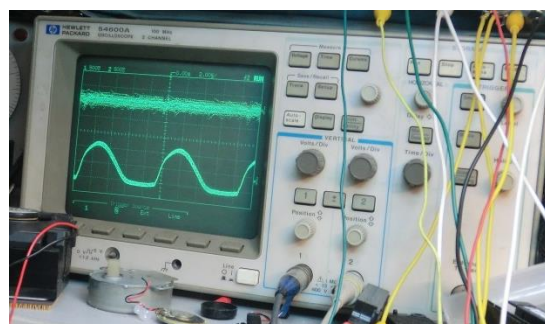


Figura 5.11 – Osciloscópio a demonstrar o sinal recebido pelo sensor ao captar 110 kHz

De seguida, ligou-se as duas placas aos potenciômetros duplos e realizou-se um segundo teste seguindo o mesmo procedimento previamente descrito, mas desta vez utilizando dois sensores piezoelétricos, dois altifalantes e um transdutor emissor. A segunda experiência, bem como os resultados obtidos no oscilador, pode ser visualizada a partir da Figura 5.12 até à Figura 5.16.

O objetivo deste ensaio foi verificar se seria possível alcançar o efeito binaural. Apesar de este ter sido bem sucedido, o som, na banda áudio, resultante continha muito ruído, o que não só dificultou a identificação direcional dos ultrassons, como também causou desconforto a quem o estava a ouvir. Após uma abordagem de análise e reconhecimento do problema a resolver, chegou-se à conclusão que o sistema não se encontrava eletricamente isolado contra interferências exteriores, por falta de blindagem

adequada. Portanto, foi necessário blindar com malha metálica (Figura 5.17) todos os cabos que estavam a ser utilizados. Consequentemente obteve-se um som claro, suave, agradável à audição e límpido, sem a existência de ruído.

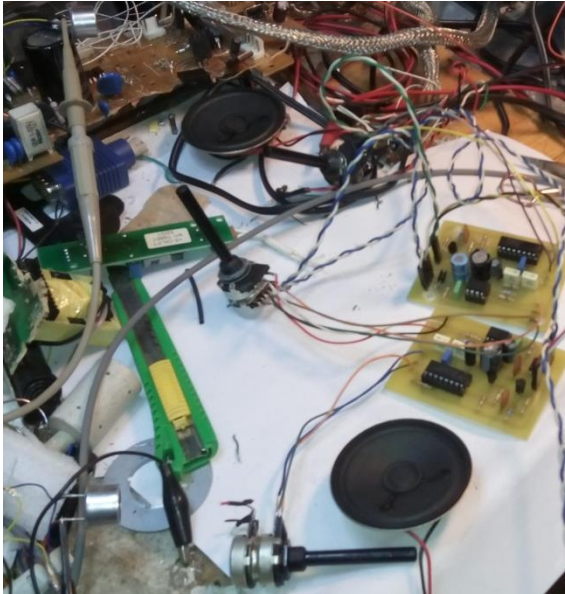


Figura 5.12 – Teste realizado às duas placas PCB para verificar a possibilidade de alcançar o efeito binaural



Figura 5.13 – Transdutor transmissor ligado ao gerador de frequências (HP 33120A)

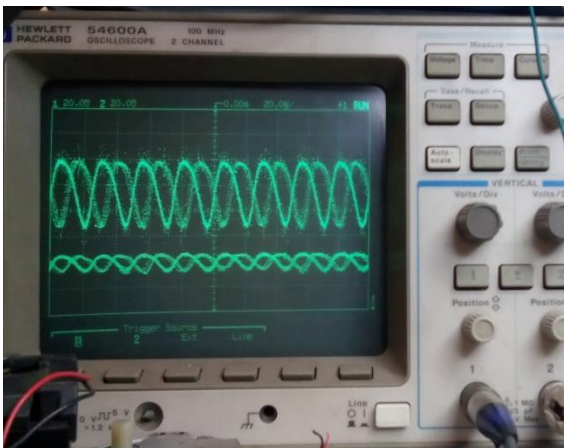


Figura 5.14 – Gráfico do oscilador quando a fonte dos ultrassons se encontra próxima do recetor esquerdo

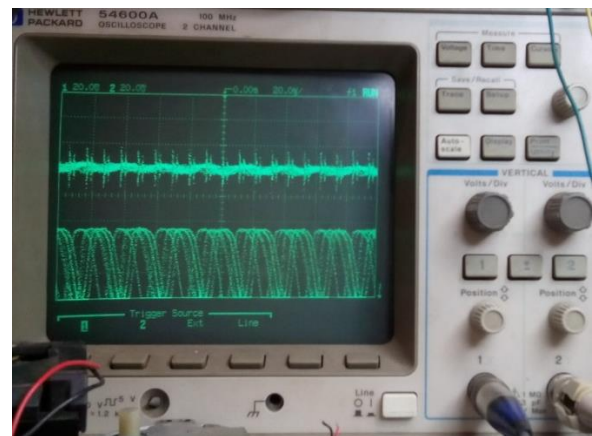


Figura 5.15 – Gráfico do oscilador quando a fonte dos ultrassons se encontra próxima do recetor direito

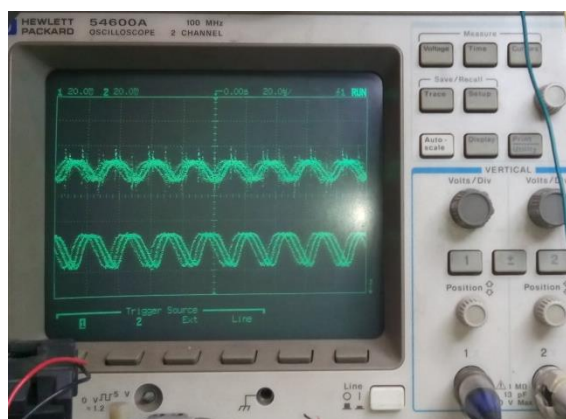


Figura 5.16 – Gráfico do oscilador quando a fonte dos ultrassons se encontra à mesma distância dos dois recetores



Figura 5.17 – Cabo envolvido com malha metálica

Após concluída a primeira etapa, procedeu-se à montagem das duas placas PCB dentro da caixa. Para isso, foi necessário furar a caixa e as placas visando a colocação de quatro parafusos M3 para as fixar, como se pode observar na Figura 5.18.

Tendo em vista um bom isolamento do sistema foi necessário colocar uma folha de alumínio e um pedaço de plástico sobreposto a esta entre a caixa e o lado inferior da primeira placa evitando assim quaisquer contatos elétricos indesejáveis. Posteriormente, colocou-se sobre esta mais um pedaço de plástico e outra folha de alumínio, desta vez pousada sobre este, voltando a colocar outra porção de plástico depois desta. A segunda placa foi então disposta acima deste último pedaço de plástico. É possível verificar o resultado de todo este processo na Figura 5.19. Para terminar, envolveu-se todo este sistema com alumínio (Figura 5.20) ficando assim perfeitamente à prova de EMF (*Electromagnetic Frequency*).



Figura 5.18 – Furação das placas PCB e da caixa



Figura 5.19 – Montagem das placas PCB na caixa



Figura 5.20 – Placas PCB envolvidas em alumínio para garantir bom isolamento

O passo seguinte consistiu em furar a tampa de acordo com o desenho previamente elaborado (Figura 5.6) de modo a possibilitar o encaixe do interruptor para ligar e desligar o dispositivo, o LED de indicação, as três fichas painel para conectar os canais de entrada e saída e, também, os dois potenciômetros.

Posteriormente, efetuou-se todas as ligações em falta para conectar as fichas de painel, o interruptor ON/OFF e o respetivo LED de indicação ao circuito. Após terminada esta tarefa, encaixou-se todos os componentes nas suas posições devidas, na tampa da caixa, tal como se pode observar na Figura 5.21 e na Figura 5.22. Assim, deu-se por concluída a caixa com aspeto profissional, funcional e de utilização intuitiva que incorpora todo o sistema eletrónico do dispositivo (Figura 5.23).



Figura 5.21 – Interior do dispositivo



Figura 5.22 – Tapa do dispositivo



Figura 5.23 – Dispositivo de detecção de fugas desenvolvido

Para a construção do suporte para os sensores utilizou-se uma ligação tripla usualmente usada em mangueiras de jardinagem (Figura 5.24) e um tubo PVC de condutas de cabos elétricos para construção civil que foi, posteriormente, cortado. Além disso, foi preciso dobrar as porções de tubo para se conseguir obter a forma e distância entre sensores pretendida.

Para a execução deste processo encheu-se os tubos de areia e aplicou-se calor sobre estes, fazendo uso de um gerador de ar muito quente, de cariz profissional.

De seguida, montou-se os sensores no topo de dois tubos PVC e fez-se as ligações necessárias para que seja possível conectar os sensores ao dispositivo.

Foram aplicados dois tubos de alumínio no topo dos sensores para a realização de deteções de contacto direto que permitissem a captação e caracterização de defeitos internos em maquinaria. Estes dois tubos estão exteriormente isolados com tubo de condutas de isolamento térmico, com o intuito de reduzir consideravelmente a influência do vento na captação e análise de sinais em campo ou locais abertos. O suporte completo está exibido na Figura 5.25.



Figura 5.24 – Ligação tripla de mangueira



Figura 5.25 – Suporte para os sensores

O produto final pode ser observado na Figura 5.26.

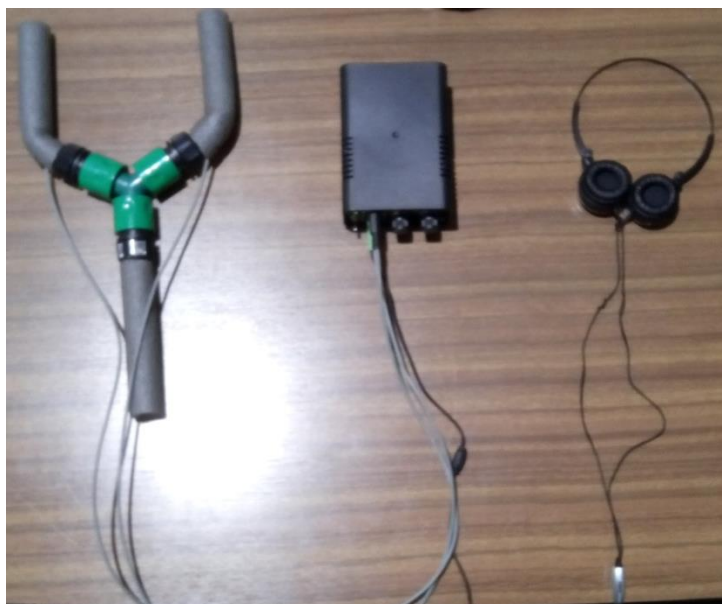


Figura 5.26 – Produto final do projeto

6. Testes Experimentais

Após a conclusão do projeto, procedeu-se à realização de diversas experiências para verificar se todos os objetivos foram alcançados.

Inicialmente, realizou-se um teste ligando um transdutor emissor a um gerador de frequências de diversas formas de onda (HP 33120A) para emitir ultrassons, ligou-se os auscultadores e os sensores ao dispositivo e ligou-se também estes a um osciloscópio (HP 54600A) para ser possível a visualização em tempo real dos sinais por estes captados, da forma como está representado na Figura 6.1.

Os resultados obtidos podem ser observados nas figuras abaixo (Figura 6.2, Figura 6.3 e Figura 6.4).

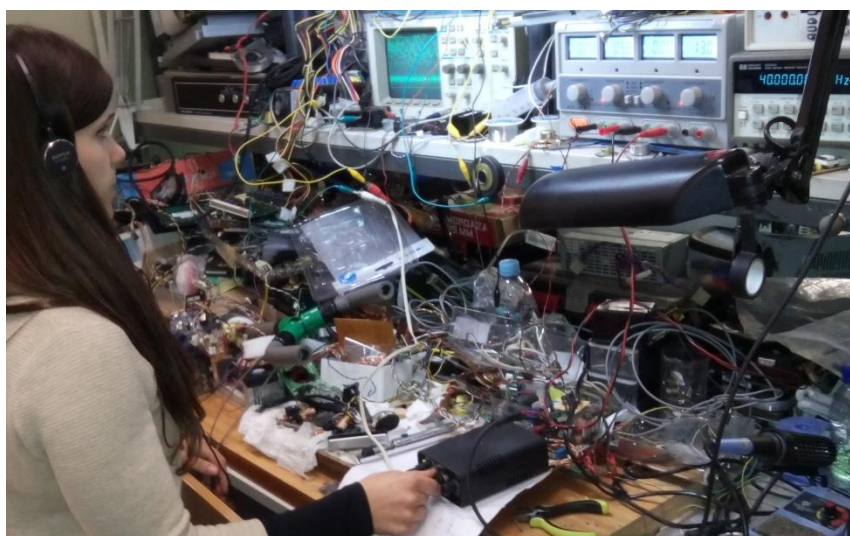


Figura 6.1 – Teste para verificar se o produto final funciona

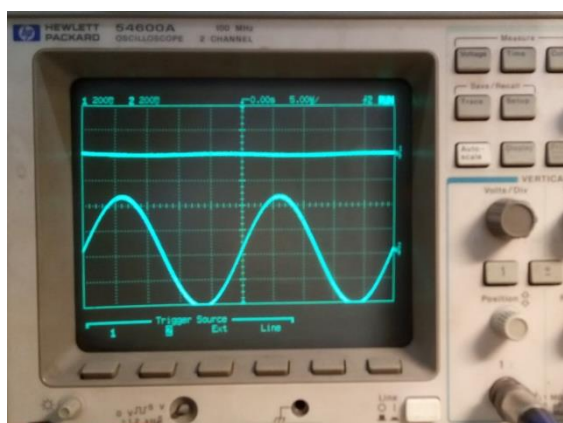


Figura 6.2 – Gráfico do oscilador quando a fonte dos ultrassons se encontra apontado a uma distância de 1 metro na direção do sensor direito

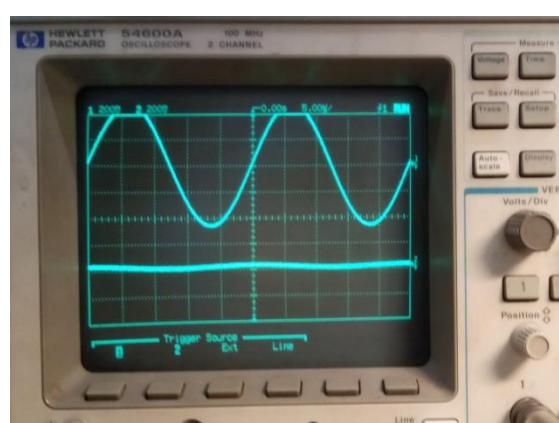


Figura 6.3 – Gráfico do oscilador quando a fonte dos ultrassons se encontra apontado a uma distância de 1 metro na direção do sensor esquerdo

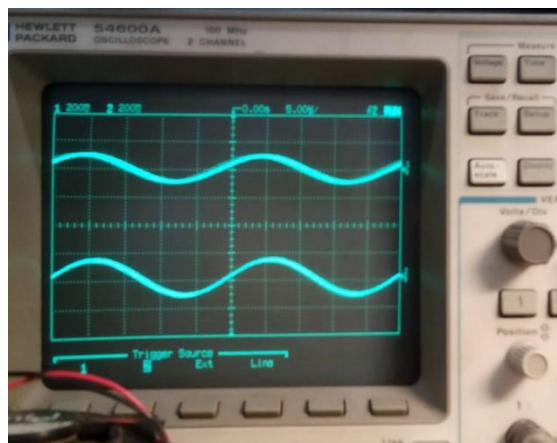


Figura 6.4 – Gráfico do oscilador quando a fonte dos ultrassons se encontra à mesma distância dos dois sensores

Com o sistema desenvolvido conseguiu-se também ouvir não só o óleo a circular dentro de condutas, mas também as válvulas a fechar e a abrir no interior de uma servo válvula. Para além disso, foi possível ouvir os ruídos dos rolamentos e restantes mecanismos internos sujeitos a movimento de um acoplamento motor elétrico-bomba.

Foi realizado um teste a uma máquina industrial, laboratorial e de investigação de corte que usa disco de diamante (Figura 6.5), com o qual se conseguiu verificar que todos os componentes mecânicos móveis estavam em perfeitas condições e a funcionar devidamente. No entanto, foi possível deduzir que a máquina não estava corretamente montada, existindo fugas indevidas de ventilação forçada para refrigeração do acoplamento motor-disco de corte, provocando um fluxo de ar turbulento, perfeitamente identificável pelo equipamento desenvolvido que permitiu deduzir o afastamento do óleo de refrigeração de superfície de corte devido a essa impulsão de ar. Este facto foi posteriormente confirmado pela técnica especializada que habitualmente opera o equipamento. Os sinais captados pelo aparelho desenvolvido estão apresentados na Figura 6.6, na Figura 6.7 e na Figura 6.8.



Figura 6.5 – Teste de uma máquina industrial de corte com disco de diamante

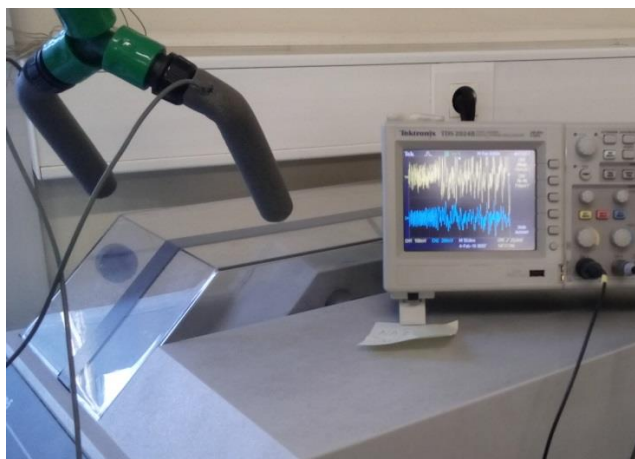


Figura 6.6 – Sinais captados pelo dispositivo aquando do teste realizado à máquina industrial de corte com disco de diamante



Figura 6.7 – Sinais captados pelo sensor esquerdo do dispositivo aquando do teste realizado à máquina industrial de corte com disco de diamante

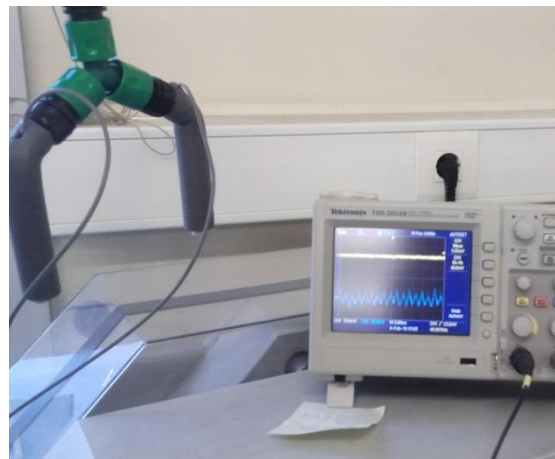


Figura 6.8 – Sinais captados pelo sensor direito do dispositivo aquando do teste realizado à máquina industrial de corte com disco de diamante

Para além disso, utilizou-se uma mangueira extensiva própria para utilização de pressões até os 150 psi, ligada a 6,3 bar para realizar outro teste. Para tal, furou-se a mangueira com uma agulha (Figura 6.9) e averiguou-se se o dispositivo desenvolvido conseguiria detetar a fuga. De facto, o teste foi bem sucedido, como se pode ver na Figura 6.10 e na Figura 6.11.



Figura 6.9 – Furo realizado na mangueira extensiva



Figura 6.10 – Sinais captados pelo sensor direito do dispositivo desenvolvido aquando do teste realizado com uma mangueira extensiva ligada a 6,3 bar

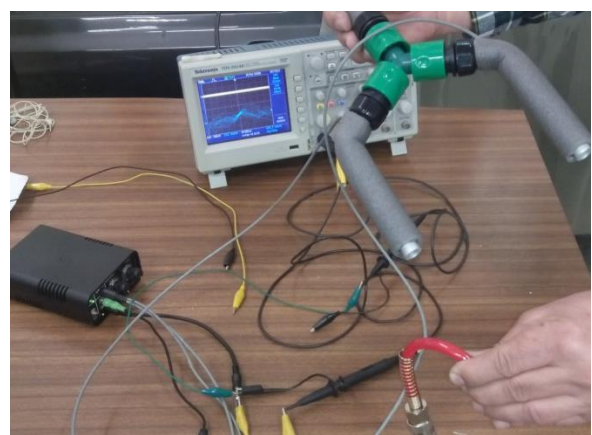


Figura 6.11 – Sinais captados pelo sensor esquerdo do dispositivo desenvolvido aquando do teste realizado com uma mangueira extensiva ligada a 6,3 bar

Por fim, fez-se um teste utilizando um acoplamento motor – bomba de ar para equipamentos de medição de tensão arterial vendido nas farmácias (Figura 6.12). Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 6.13 e na Figura 6.14.



Figura 6.12 – Acoplamento motor – bomba de ar para equipamentos de medição de tensão arterial

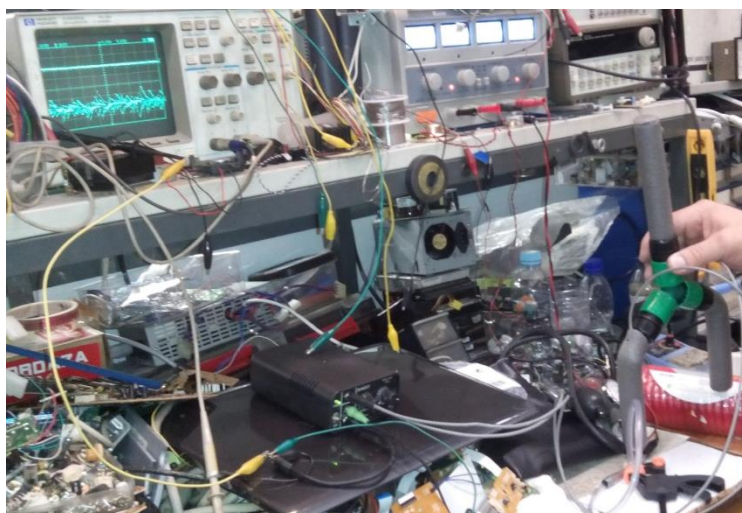


Figura 6.13 – Sinais captados pelo sensor esquerdo do dispositivo desenvolvido aquando do teste realizado ao acoplamento motor – bomba de ar para equipamentos de medição de tensão arterial

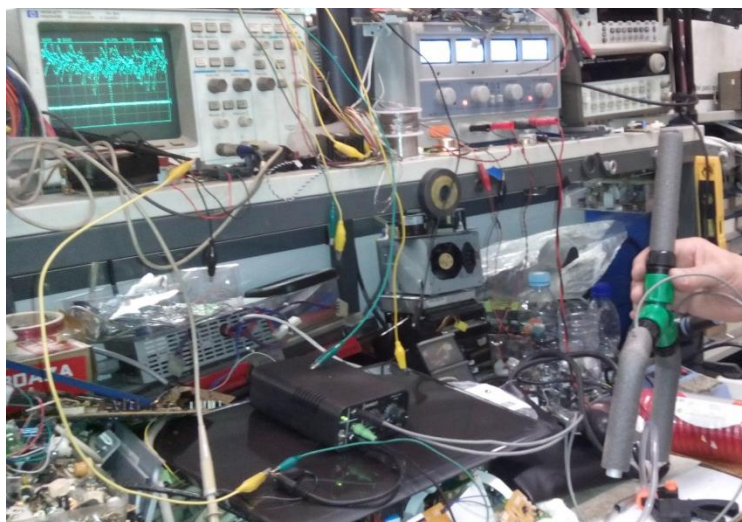


Figura 6.14 – Sinais captados pelo sensor direito do dispositivo desenvolvido aquando do teste realizado ao acoplamento motor – bomba de ar para equipamentos de medição de tensão arterial

7. Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1. Conclusões

A presente dissertação apresenta o desenvolvimento de um dispositivo binaural para a deteção de fugas de gases e líquidos. O principal objetivo para o aparelho foi que este possibilitasse a localização e deteção de possíveis avarias, à distância e de uma forma intuitiva, numa instalação industrial. Para isso, desenvolveu-se um sistema com duas placas de circuito impresso, utilizou-se um potenciômetro duplo para a regulação do volume, outro potenciômetro duplo para a sintonização e um circuito integrado PLL (CD 4046) para executar a conversão de frequências ultrassónicas em frequências audíveis, dotado de saída de sinal em tempo real para aquisição e tratamento digital imediato, como por exemplo espectral, ou para arquivar e tratamento posterior.

Na verdade, há uma variedade de tecnologias que se pode aplicar para a captação e conversão de sinais ultrassónicos. No entanto, pensa-se que a solução encontrada foi a mais viável e versátil para alcançar e superar os objetivos inicialmente pretendidos e conceber um sistema o mais compacto e portátil possível.

No decorrer do projeto foram surgindo algumas dificuldades e complicações, como, por exemplo, na eliminação do ruído presente no sinal de saída do sistema. Para a resolução desta questão foi essencial uma deliberação acerca das possíveis origens do problema, chegando-se então à conclusão que se tratava de deficiente isolamento EMF (*Electromagnetic Frequency*) ou de interferência por radiofrequência exterior ao sistema. De facto, para a concretização deste trabalho foi crucial a realização de um estudo aprofundado acerca dos mais variados temas relativos ao assunto em questão e não só.

Após a conclusão da conceção do dispositivo, procedeu-se à realização de experiências para confirmar se os objetivos propostos foram alcançados. Começou-se por utilizar um transdutor emissor, ligado a um gerador de frequências de diversas formas de onda, para averiguar se o sistema conseguia detetar os ultrassons por este emitidos e convertê-los em sons audíveis, para verificar se o efeito binaural foi conseguido e se a deteção à distância seria possível. Os resultados obtidos neste teste foram positivos. Desta forma, seguiu-se então com a execução de novas experiências para investigar o que seria possível detetar e identificar com este equipamento. Com isto, conseguiu-se ouvir o óleo a circular dentro de condutas, os sons efetuados pelos rolamentos internos de um acoplamento motor elétrico-bomba, permitindo assim determinar eventuais batimentos repetitivos correspondentes a rolamentos gripados, e o fecho e abertura de válvulas alojadas no interior de uma servoválvula.

Desta forma, foi possível provar-se que todos os objetivos pretendidos foram cumpridos. Os resultados conseguidos foram deveras positivos e encorajadores, uma vez que se conseguiu superar os objetivos iniciais. Isto é, para além de detetar e localizar fugas, com a qualidade do som que se conseguiu obter, o dispositivo desenvolvido proporciona a capacidade de identificar se o fluxo é laminar ou turbulento, bem como de ouvir efeitos Doppler. Outra vantagem deste equipamento é o facto de este ser útil para outras indústrias, como na medicina, por exemplo. Por outro lado, poderia também ser utilizado para escutar e estudar morcegos, entre outras muitas aplicações.

Em conclusão, a presente dissertação revelou-se bastante estimulante e, no final da sua realização, notou-se que o projeto desenvolvido é multifacetado e oferece uma vasta possibilidade de aplicações.

7.2. Trabalhos Futuros

Os resultados obtidos no final deste trabalho foram bastante positivos e estimulantes. No entanto, o projeto desenvolvido revela propriedades que motivam a continuação do seu desenvolvimento e evolução.

Uma hipótese de alteração poderia ser, por exemplo, a substituição dos sensores de acordo com as diversas aplicações que se pretenda que o sistema execute. Poder-se-ia utilizar sensores de gases para se conseguir detetar e distinguir diferentes gases ou até mesmo sensores óticos para captar infravermelhos, por exemplo.

Outra opção possível seria concretizar a evolução do dispositivo concebido para um sistema digital, já integrado na caixa com DSP (*Digital Signal Processor*) e eventual ecrã tátil de informação e atuação de controlo do dispositivo, capaz de caracterizar mais exhaustivamente os gases ou líquidos detetados em termos de caudais de fuga e tipos de elementos.

Adicionalmente, seria viável tornar este num sistema com alimentação recarregável.

Referências

1. SDT International, *The Precision of Ultrasonics*, FLEX.US Ultrasound Detector. URL: <http://www.sdt.eu/index.php?page=products-uld-flexus-overview&hl=en>.
2. Amprobe, *User's Manual*, TMULD-300 Ultrasonic Leak Detector. URL: <http://www.amprobe.com/amprobe/usen/hvac-tools/ultrasonic-leak/amp-tmuld-300.htm?pid=73418>.
3. Amprobe, *TMULD-300 Ultrasonic Leak Detector, Data Sheet*. URL: <http://www.amprobe.com/amprobe/usen/hvac-tools/ultrasonic-leak/amp-tmuld-300.htm?pid=73418>.
4. Inficon, *Operating Manual*, Whisper Ultrasonic Leak Detector. URL: <http://products.inficon.com/en-us/Product/Detail/Whisper-Ultrasonic-Leak-Detector?path=Pro>.
5. Inficon, *Inficon Service Tools: A Catalog for Service Professionals*. URL: <http://products.inficon.com/en-us/Product/Detail/Whisper-Ultrasonic-Leak-Detector?path=Pro>.
6. Spectroline, *Fluorescent Leak Detection and Specialty Tools for Industrial Systems*. URL: <http://www.spectroline.com/mde-2000nc-industrial>.
7. Spectroline, *MarksmanTM II Ultrasonic Diagnostic Tool*. URL: <http://www.spectroline.com/mde-2000nc-industrial>.
8. SKF, *Ultrasonic Leak Detector TMSU 1*. URL: <http://www.skf.com/group/products/condition-monitoring/basic-condition-monitoring-products/ultrasonic-instruments/ultrasonic-leak-detector/index.html>.
9. Carr, J., *The Technician's Radio Receiver Handbook*, 2001. Newnes.
10. Roon, Tony, *Phase Locked Loop Tutorial, PLL*, 2001.
11. Reis, Jorge, *Técnicas de Sonar para Detecção de Obstáculos em Navegação*, 1999. Universidade do Porto: Faculdade de Engenharia.
12. Gabay, Jon, *Fundamentals of Piezoelectric Shock and Vibration Sensors*, 2015. Electronic Products Magazine.
13. PCB Piezotronics, *General Piezoelectric Theory*, 2015.
14. Petterson, Lars, *The Properties of Sound and Bat Detectors*, 2002. Bat Echolocation Research.
15. Britzke, Eric R, *Designing Monitoring Programs Using Frequency Division Bat Detectors: Active versus Passive Sampling*, 2002. Bat Echolocation Research.
16. Messina, Tony, *Frequency Division: A Technical Overview*, 2002. Bat Echolocation Research.
17. Limpens, Herman J. G. A., *Choosing a Bat Detector: Theoretical and Practical Aspects*, 2002. Bat Echolocation Research.
18. Fenton, M. Brock, *Bat Natural History and Echolocation*, 2002. Bat Echolocation Research.